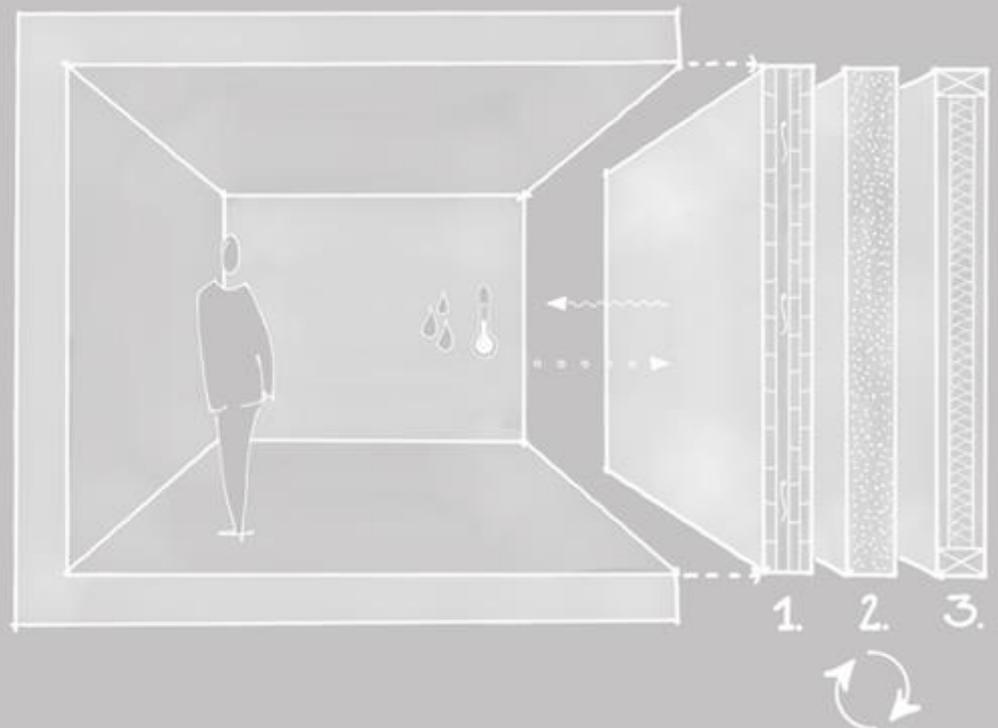


Anhang zur BBSR-  
Online-Publikation  
17/2022

# Anlagen: Potenziale hygrothermisch aktivierter Bauteile

Autorinnen und Autoren

Nina Flexeder  
Michael Kamml  
Johannes Paulik



# Anlagen zum Forschungsbericht

## Potenziale hygrothermisch aktivierter Bauteile (PhyTAB)

Energieeffiziente Raumkonditionierung mittels luftdurchströmter Massivholzelemente und hygroskopisch optimierter Oberflächen

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**ZUKUNFT BAU**  
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Auftrag des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-18.46

Projektlaufzeit: 02.2019–08.2021

## Impressum

### Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)  
Deichmanns Aue 31–37  
53179 Bonn

### Wissenschaftliche Begleitung/Fachbetreuer

Dr.-Ing. Michael Brüggemann  
Brüggemann Kisseler Ingenieure im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung im Bauwesen“  
zb@bbr.bund.de

### Autorinnen und Autoren

Nina Flexeder, M.Sc. (Lehrstuhl Holzbau und Baukonstruktion, TUM)  
nina.flexeder@tum.de

Michael Kamml, M.Sc. (Lehrstuhl Holzbau und Baukonstruktion, TUM)

Johannes Paulik, B.Sc. (Lehrstuhl Holzbau und Baukonstruktion, TUM)

Technische Universität München, München  
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter (Projektleitung)

Technische Universität München, München  
Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer

### Stand

Januar 2022

### Redaktion und Gestaltung

Nils Schumacher, Nina Flexeder

### Bildnachweis

Titelbild: Andrea Kaiser, weitere Ersteller: Nina Flexeder, Johannes Paulik; Mike Beck; Michael Kamml (Angabe an den jeweiligen Abbildungen)

### Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

### Zitierweise des Anhangs

Flexeder, Nina; Michael; Paulik, Johannes: Anlagen zum Forschungsbericht. Potenziale hygrothermisch aktivierter Bauteile (PhyTAB) – Energieeffiziente Raumkonditionierung mittels luftdurchströmter Massivholzelemente und hygroskopisch optimierter Oberflächen. Bonn, September 2022.

### Zitierweise des Hauptberichts

Flexeder, Nina; Schumacher, Nils; Hepf, Christian; Nouman, Ahmad; Briels, David; Varga, Zsafia; Kamml, Michael; Paulik, Johannes; Übelhör, Valentin; Winter, Stefan; Auer, Thomas: Potenziale hygrothermisch aktivierter Bauteile (PhyTAB) – Energieeffiziente Raumkonditionierung mittels luftdurchströmter Massivholzelemente und hygroskopisch optimierter Oberflächen. BBSR-Online-Publikation 17/2022, Bonn, September 2022.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Anlagen zu Kapitel III – Optimierung der raumklimatisierenden Wirkung</b>	<b>5</b>
Stationäre Labormessungen zur Sorptivität verschiedener Baustoffe	5
Ergebnisse der Laborversuche zum hygrothermischen Effekt	22
<b>Anlagen zu Kapitel IV – Planung und Einrichtung der Langzeitfeldversuche</b>	<b>46</b>
Details zur Messtechnik und der in Kubus Ost und West verbauten Elektrotechnik	46
Auswahl des Messsystems für die Temperaturmessung	46
Auswahl des Messsystems für die Luftfeuchtemessung	53
Auswahl des Messsystems für die Wärmestrommessung	55
Ausführungsdetails des baukonstruktiven Umbaus der Testkuben auf der Solarstation	66
<b>Verzeichnisse</b>	<b>84</b>
Abbildungsverzeichnis	84
Tabellenverzeichnis	87

## **Anlagen zu Kapitel III – Optimierung der raumklimatisierenden Wirkung**

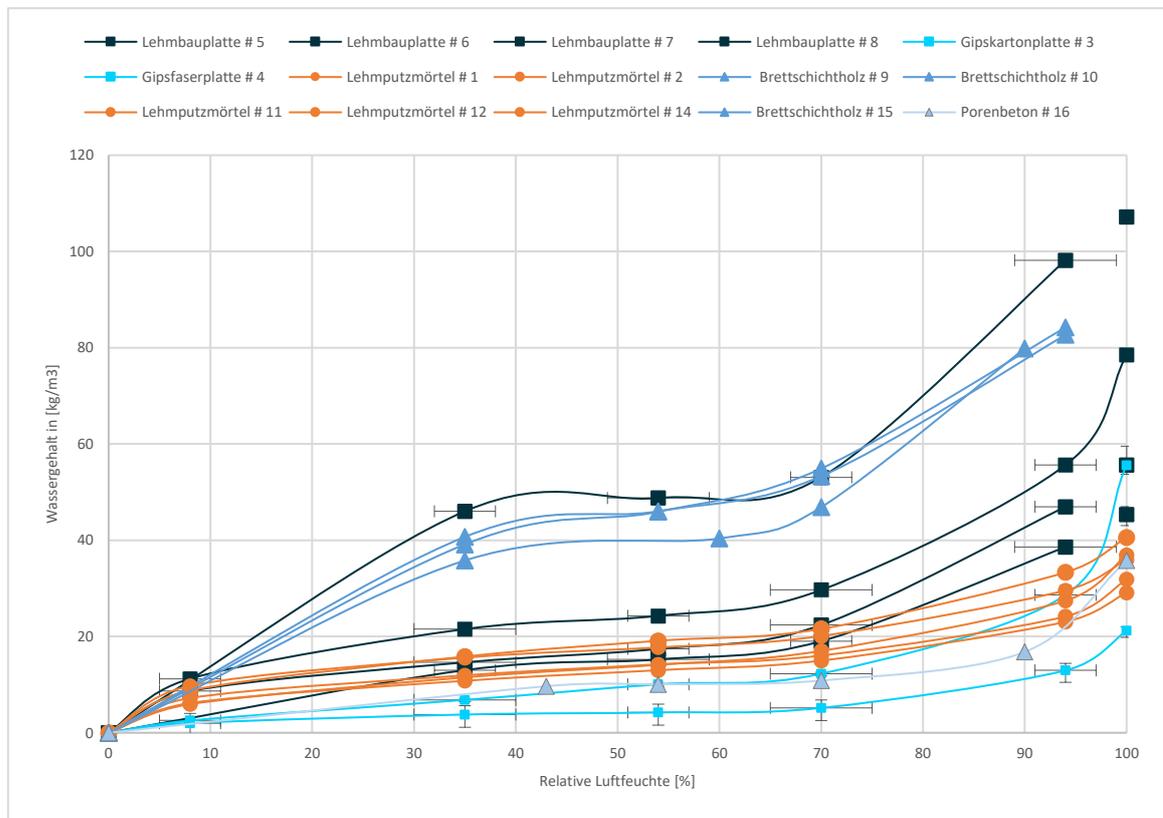
### **Stationäre Labormessungen zur Sorptivität verschiedener Baustoffe**

Nina Flexeder

Die Sorptionsisothermen auf den folgenden Seiten wurden in eigenen Messreihen erstellt. Ein überschlägiger Vergleich zeigt bereits die Tendenzen der einzelnen Baustoffgruppen, vgl. Abbildung 1. Die Materialien #5, 6,7, und 8 zeigten nach 7 tägiger Lagerung bei 100 % Luftfeuchte Verfärbungen an kleinen Stellen, was auf Sporenbildung schließen lässt. Deswegen wurde die Konditionierung an diesem Punkt abgebrochen, ohne dass die Gewichtskonstanz bereits erreicht worden wäre. Dementsprechend sind die gemessenen Werte bei 100 % Luftfeuchte für diese vier Baustoffe nicht als absolut anzusehen.

Die Photographien zeigen die Baustoffproben jeweils nach der Darrprobe, sodass typische Spuren wie Risse und Harzaustritt zu sehen sind. Alle folgenden Fotografien (Abbildung 2 - Abbildung 16) sowie die zugehörigen Auswertungen der Sorptionsisothermen sind eigene Darstellungen (Flexeder).

Abbildung 1 Vergleich der gemessenen Sorptionsisothermen aller untersuchten Baustoffgruppen



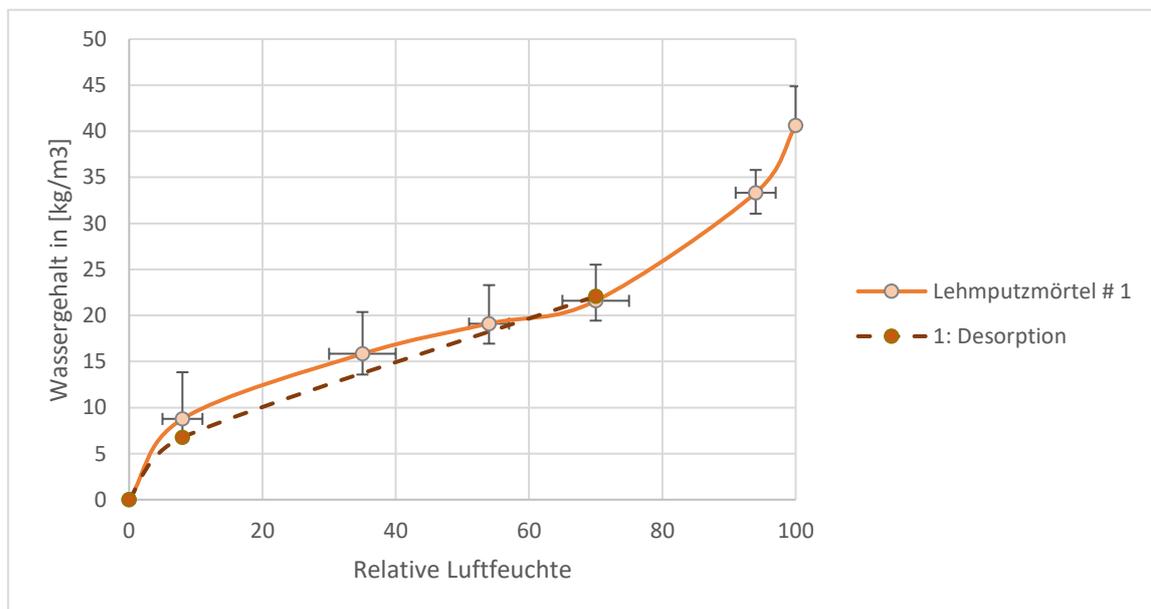
Eigene Darstellung (Flexeder)

## Lehmoberputz (fein) #1

Abbildung 2 Beispiel für eine der vier Baustoffproben



Eigene Darstellung (Flexeder)

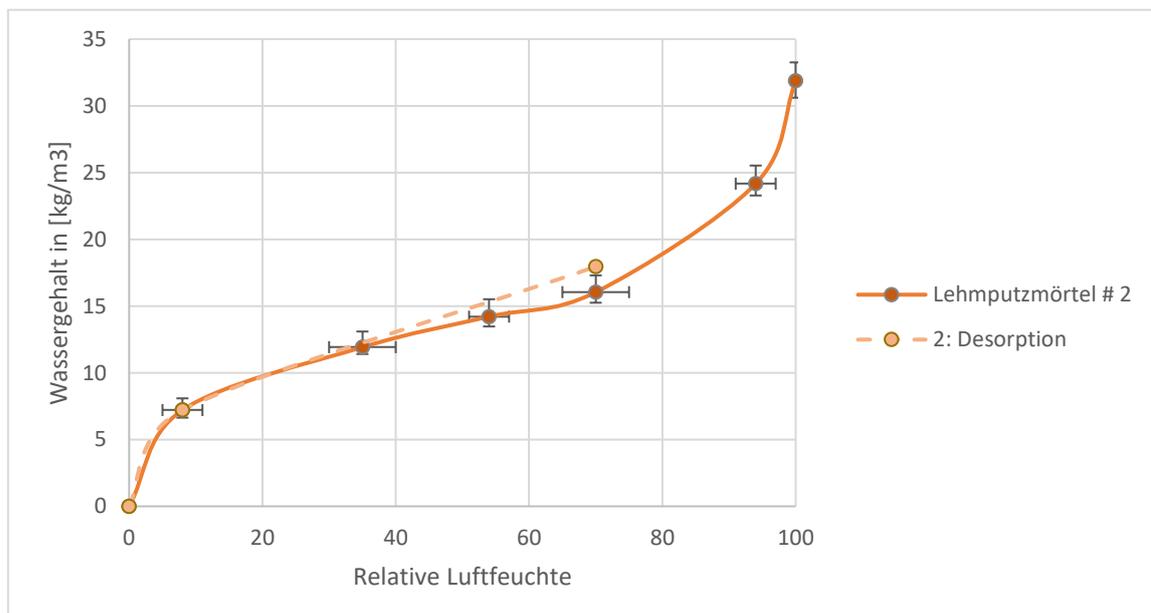


## Lehmoberputz (grob) #2

Abbildung 3 Beispiel für eine der vier Baustoffproben



Eigene Darstellung (Flexeder)

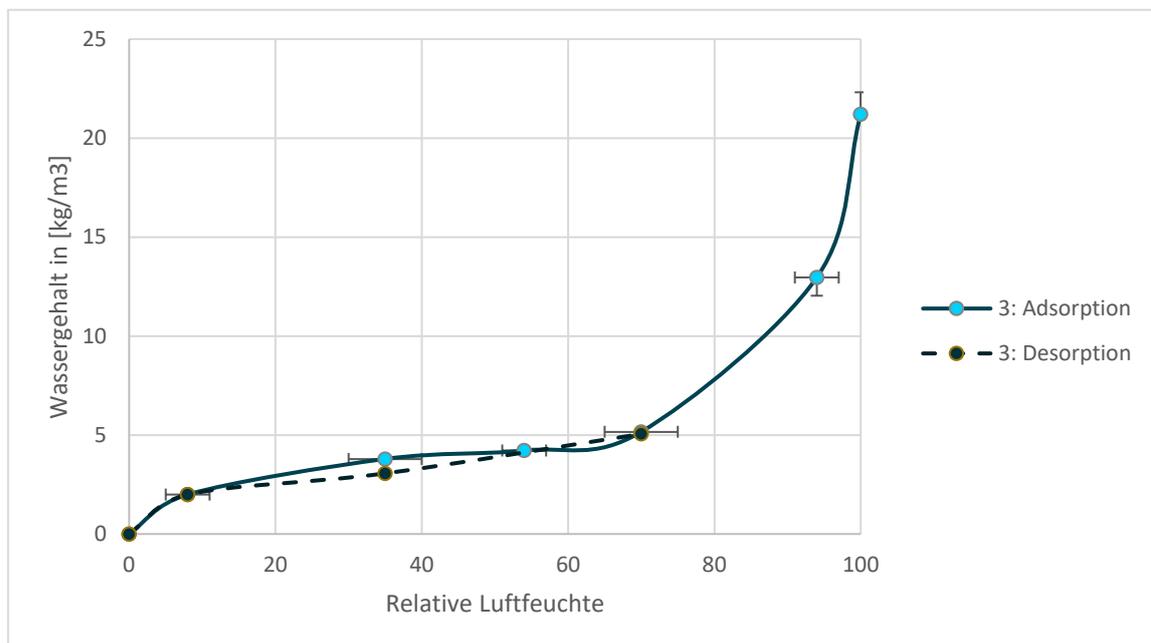


### Gipskartonplatte #3

Abbildung 4 Vier Baustoffproben #3 a - d

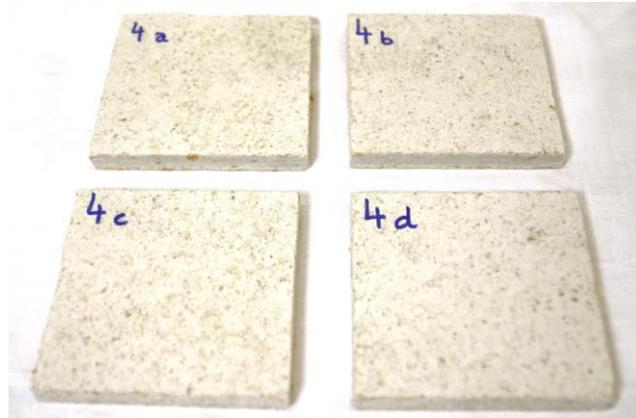


Eigene Darstellung (Flexeder)

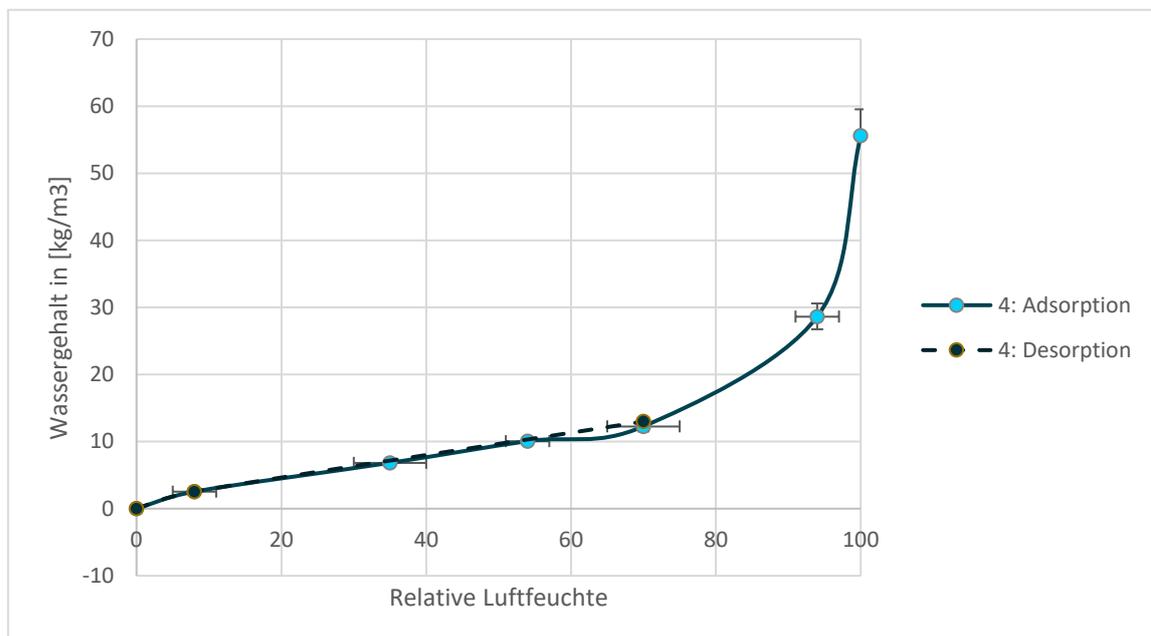


### Gipsfaserplatte #4

Abbildung 5 Vier Baustoffproben #4 a - d



Eigene Darstellung (Flexeder)

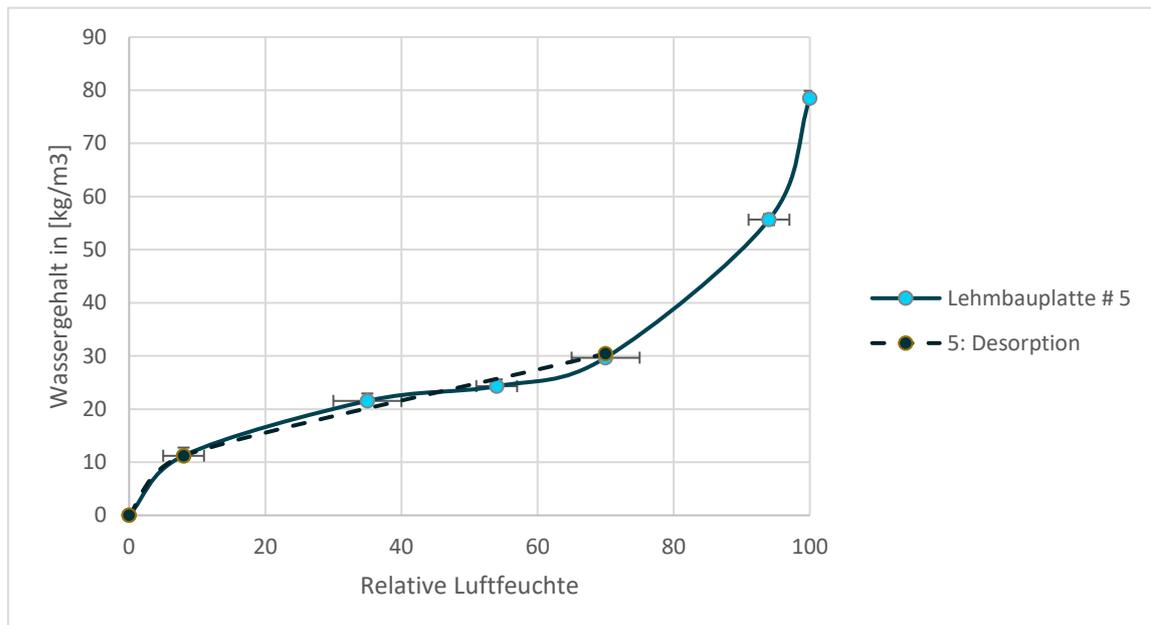


### Lehmbauplatte (Holzfasern) #5

Abbildung 6 Beispiel für eine der vier Baustoffproben



Eigene Darstellung (Flexeder)

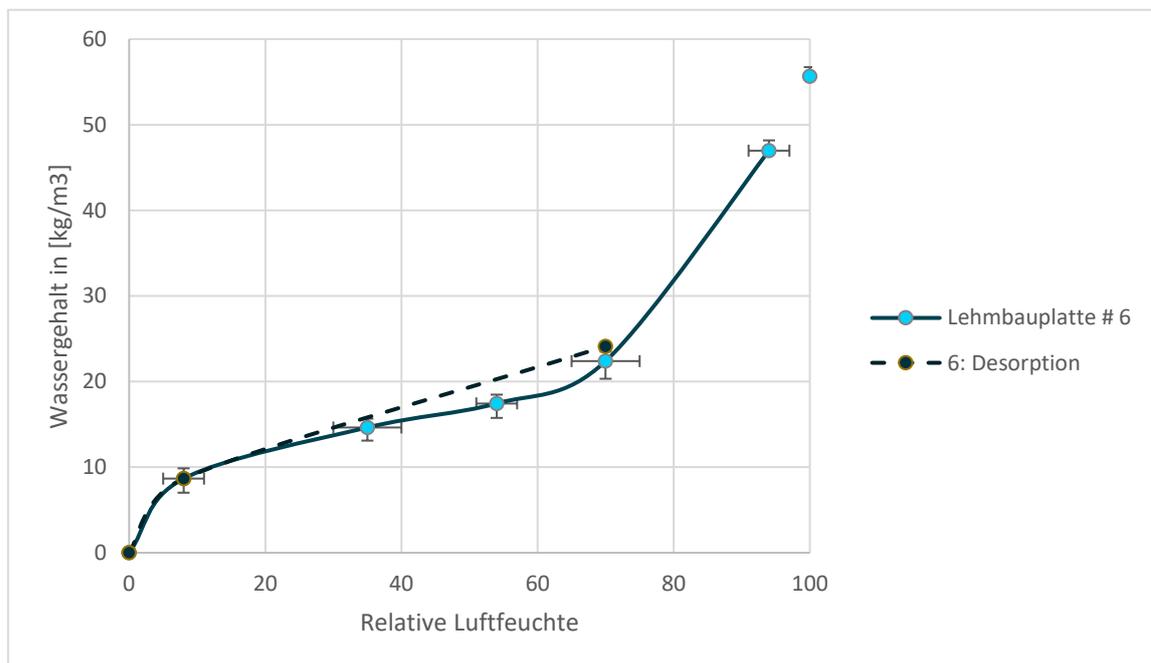


### Lehmbauplatte (Schilfrohr, dünn) #6

Abbildung 7 Beispiel für eine der vier Baustoffproben



Eigene Darstellung (Flexeder)

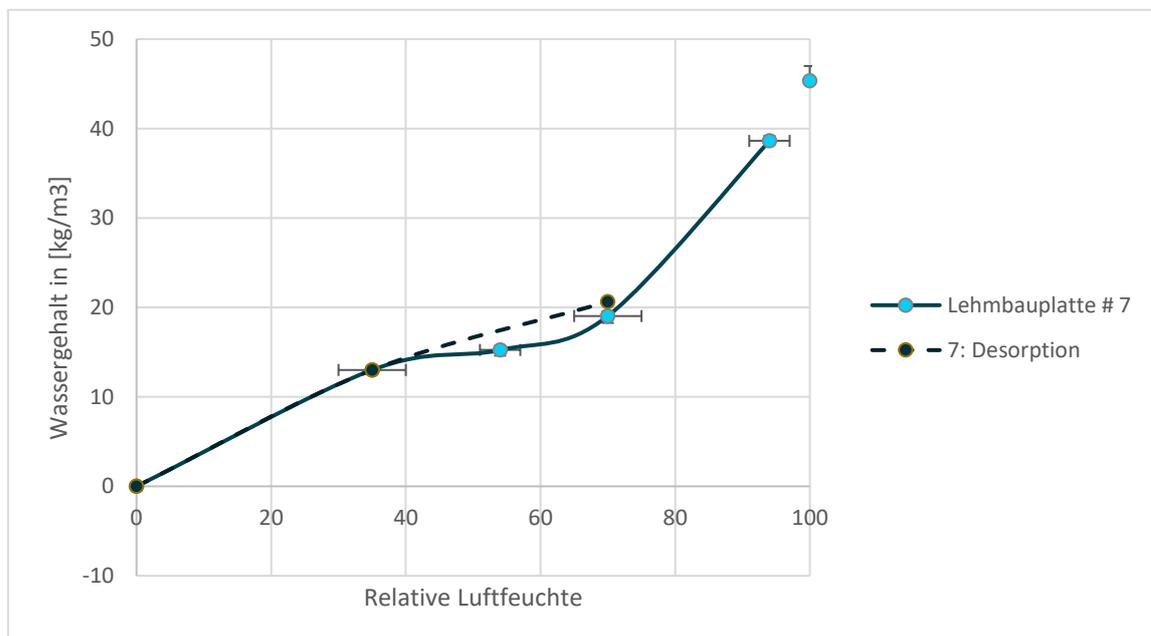


### Lehmbauplatte (Schilfrohr, dick) #7

Abbildung 8 Beispiel für eine der vier Baustoffproben



Eigene Darstellung (Flexeder)

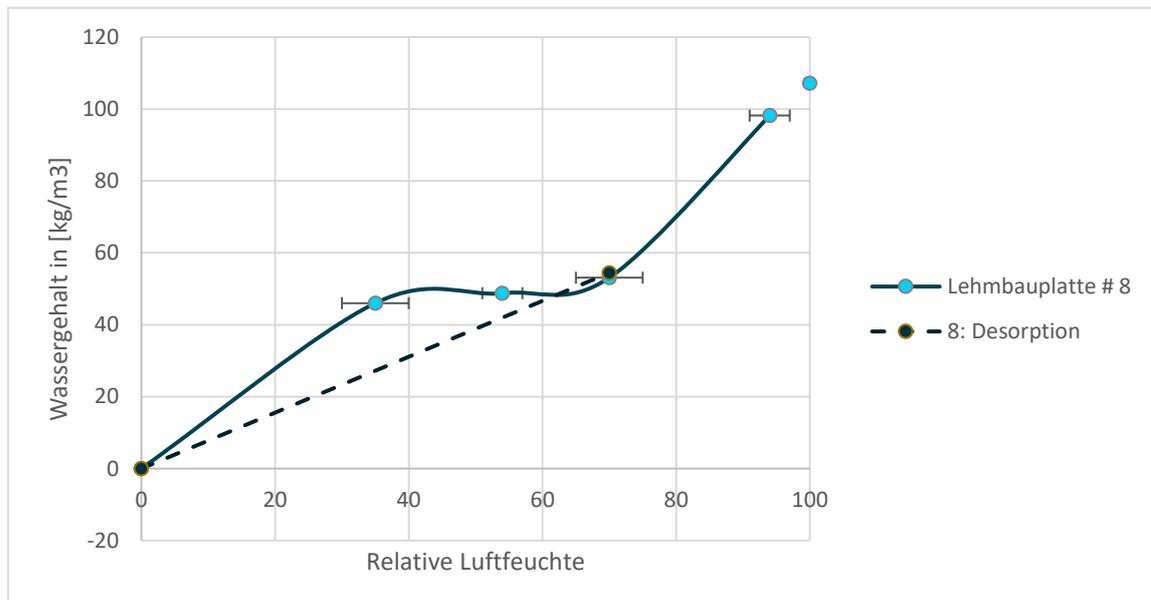


### Lehmbauplatte (Hanf) #8

Abbildung 9 Vier Baustoffproben #8 a - d

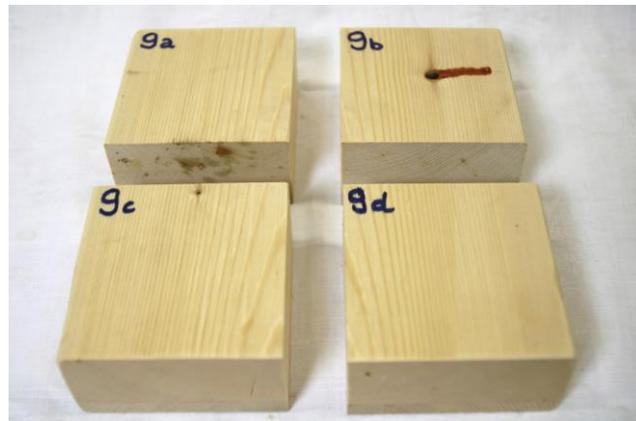


Eigene Darstellung (Flexeder)

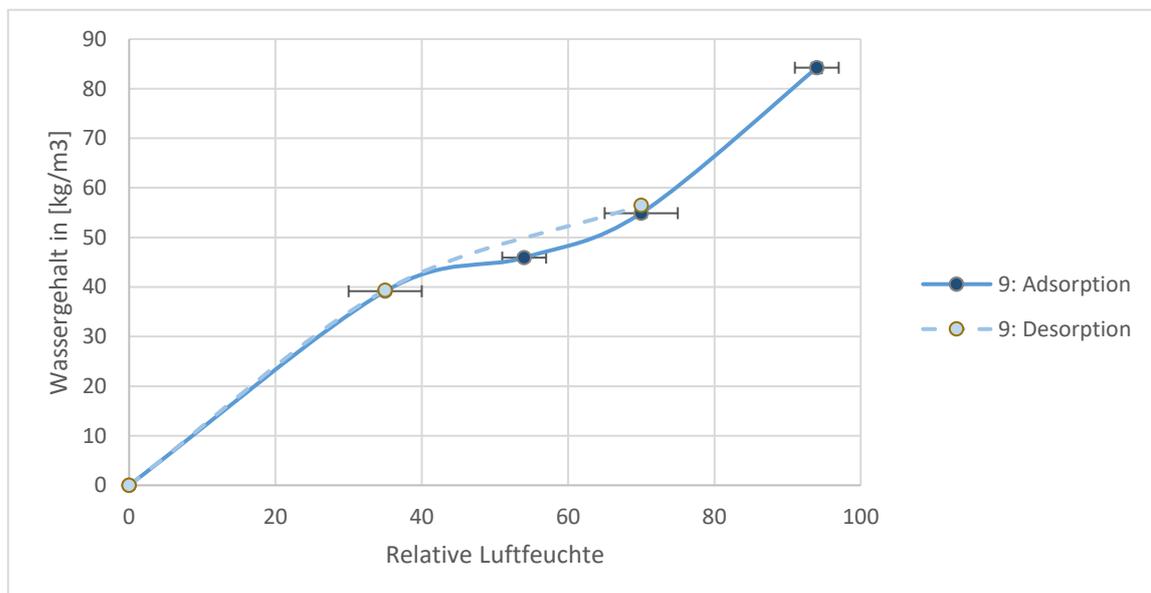


### Brettschichtholz tangential #9

Abbildung 10 Vier Baustoffproben #9 a - d

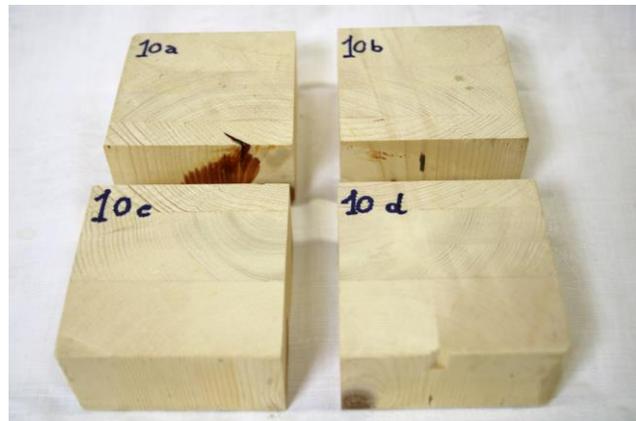


Eigene Darstellung (Flexeder)

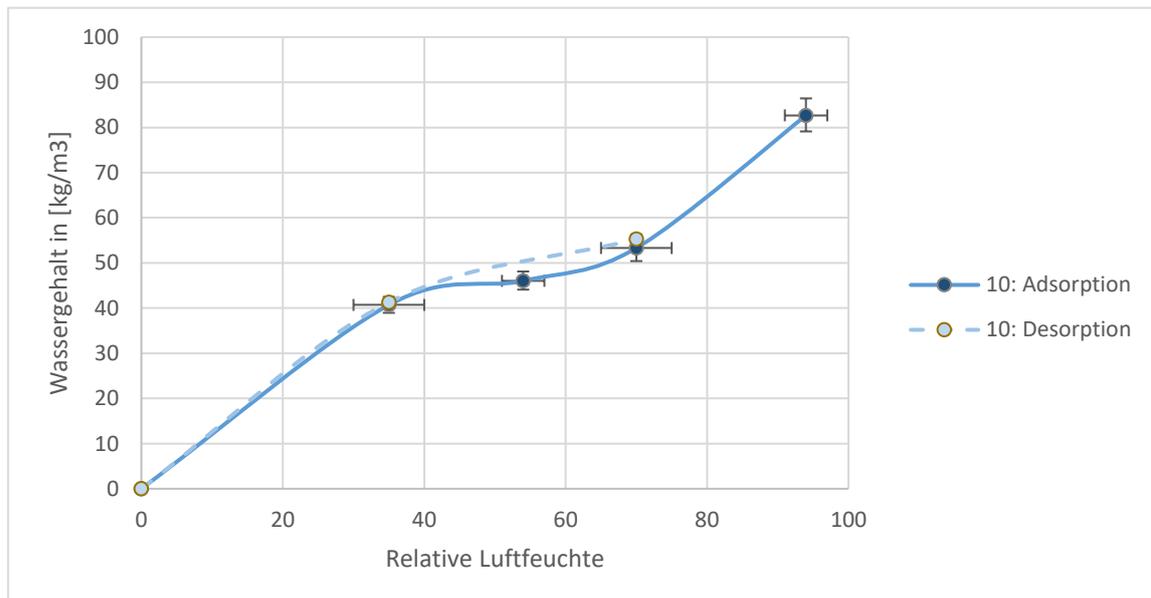


### Brettschichtholzquer #10

Abbildung 11 Vier Baustoffproben #10 a - d



Eigene Darstellung (Flexeder)

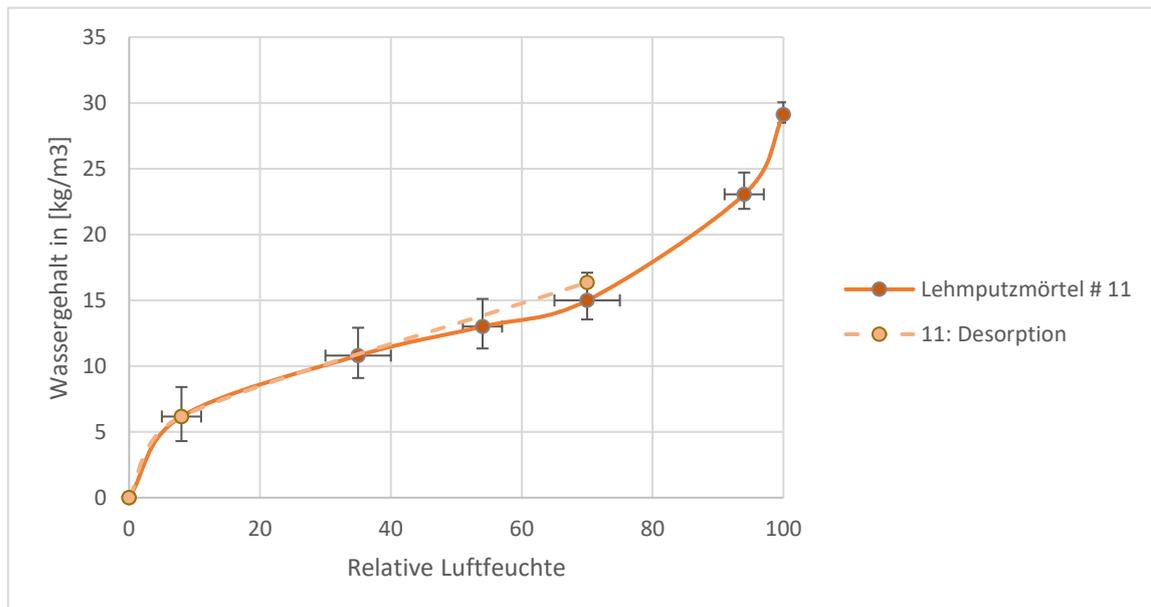


### Lehmoberputz (mineralisch) #11

Abbildung 12 Beispiel für eine der vier Baustoffproben

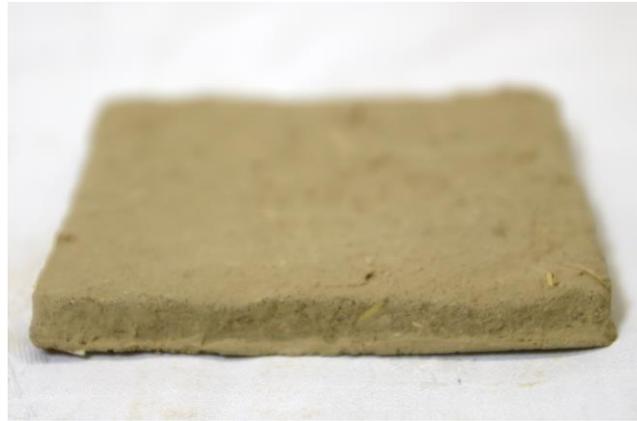


Eigene Darstellung (Flexeder)

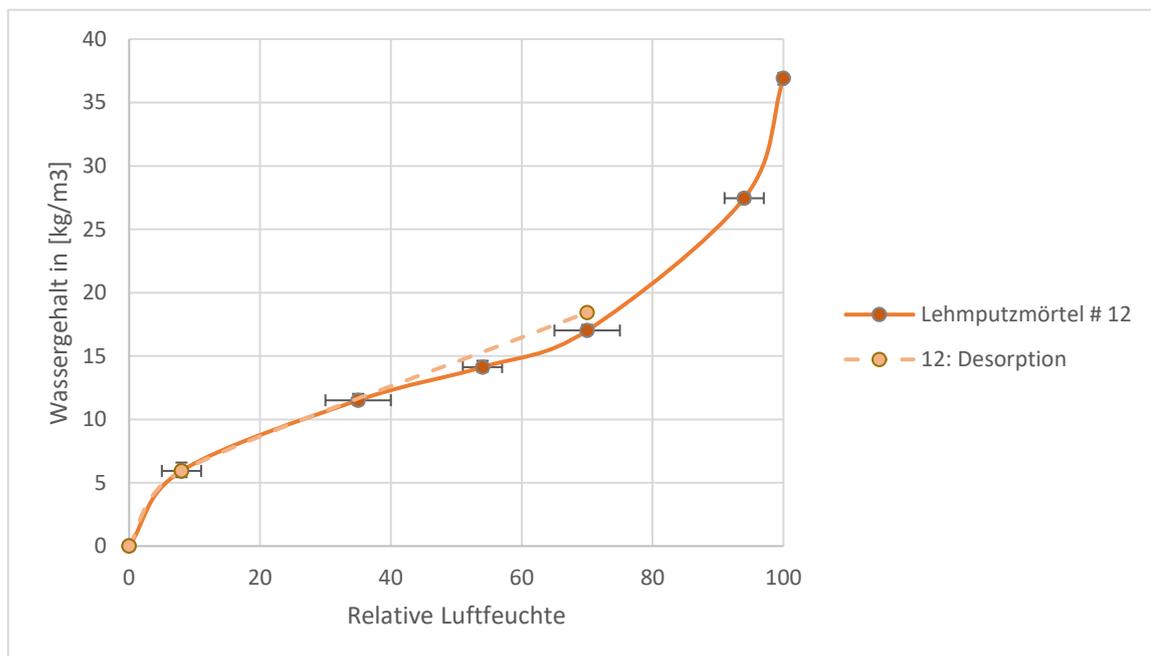


## Lehmunterputz #12

Abbildung 13 Beispiel für eine der vier Baustoffproben



Eigene Darstellung (Flexeder)

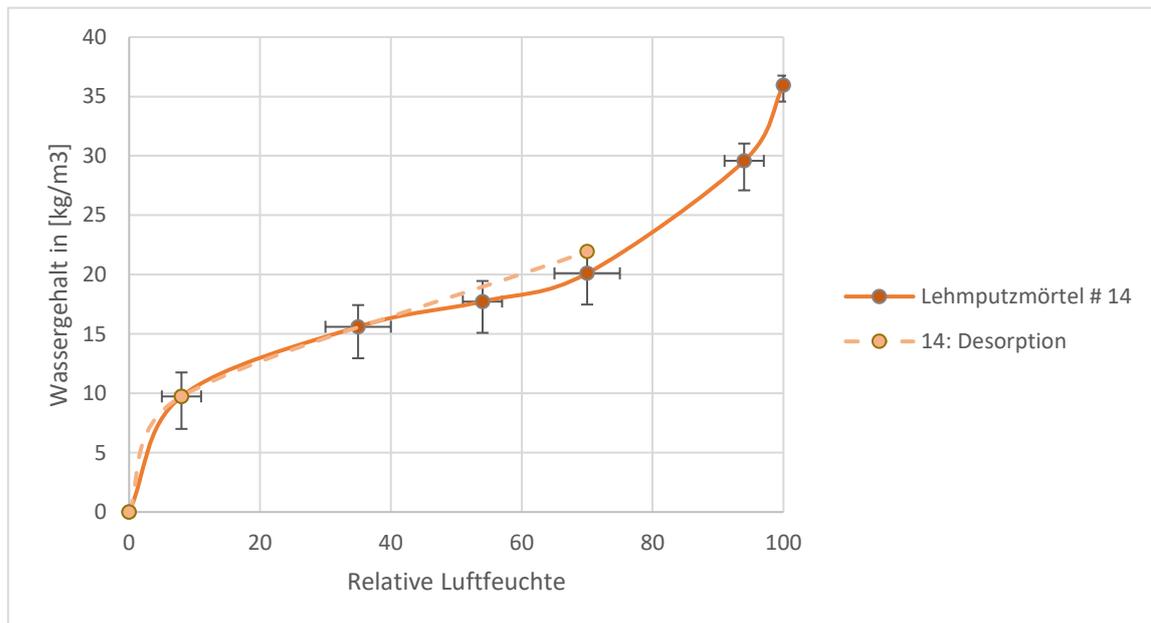


### Lehmoberputz (fein) #14

Abbildung 14 Beispiel für eine der vier Baustoffproben

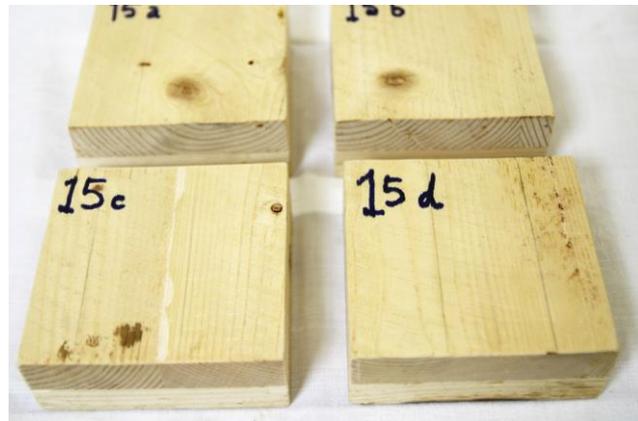


Eigene Darstellung (Flexeder)

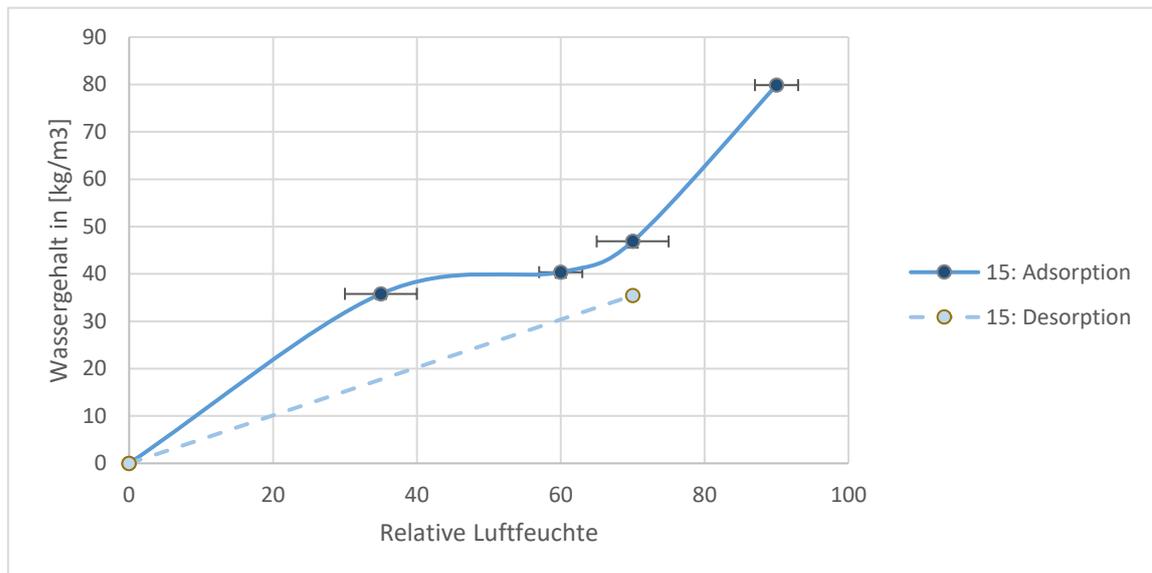


### Brettschichtholz tangential #15

Abbildung 15 Vier Baustoffproben #15 a - d



Eigene Darstellung (Flexeder)

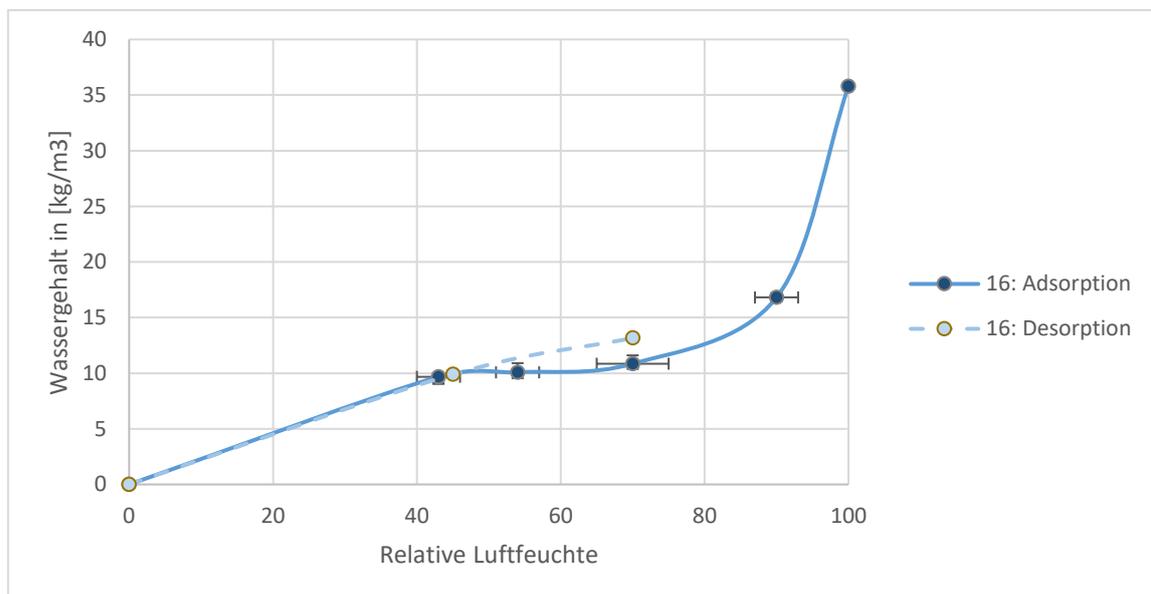


### Porenbetonstein # 16

Abbildung 16 Vier Baustoffproben #16 a - d



Eigene Darstellung (Flexeder)



## Ergebnisse der Laborversuche zum hygrothermischen Effekt

Nina Flexeder

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Materialien beziehungsweise Materialkombinationen auf ihre thermische Reaktion bei isothermen Luftfeuchtesprüngen hin untersucht.

**Tabelle 1: Im Feuchtesprungversuch untersuchte Materialien beziehungsweise Materialkombinationen**

# 3	Gipskartonplatte
# 4	Gipsfaserplatte
# 4 + # 14	Gipsfaserplatte verputzt
# 5 + # 14	Lehmbauplatte verputzt
# 5 + # 14 + Kalkanstrich	Lehmbauplatte verputzt mit zusätzlichem Kalkanstrich
# 8	Lehmbauplatte
# 9	Brettschichtholz tangential
# 10	Brettschichtholz quer
# 13	Holzweichfaserplatte
# 13 + # 14	Holzweichfaserplatte verputzt
# 16	Porenbetonstein

Eigene Darstellung (Flexeder)

Jedem hier dokumentierten Feuchtesprungversuche geht eine isotherme Entfeuchtung mit rund vier bis sieben Tagen Dauer voraus. Die Messergebnisse wurden gemäß der in Kapitel III beschriebenen Methodik bereinigt. Die dargestellten Thermographien dokumentieren die Wärmeverteilung und wurden innerhalb des Messstunden zeitlich verteilt aufgenommen. Die erste zeigt jeweils den Zustand etwa 30 Sekunden unmittelbar nach dem Luftfeuchtesprung. Durch eine thermographische Untersuchung der Oberflächen nach ausreichender isothermer und isobarer Lagerung wurde die Ähnlichkeit der einzelnen Oberflächen überprüft. Es zeigten sich große Übereinstimmungen der Emissivitäten von Probekörperoberflächen mit jenen der abgeklebten Referenzkörperoberfläche; mit Ausnahme der Kalkoberfläche. Beim Vergleich der hygrothermischen Masse verschiedener Einzelmessungen untereinander sind die unterschiedlichen Luftfeuchtesprünge sowie Zeiträume zu beachten. Alle folgenden Fotografien, Thermographien (Abbildung 18 - Abbildung 39) sowie die zugehörigen Auswertungen der Experimente sind eigene Darstellungen (Flexeder).

**Abbildung 17: Zeitliche Abfolge der im Folgenden dargestellten Thermographien**

a	b	c
d	e	f
g	h	i

Eigene Darstellung (Flexeder)

### Gipskartonplatte #3

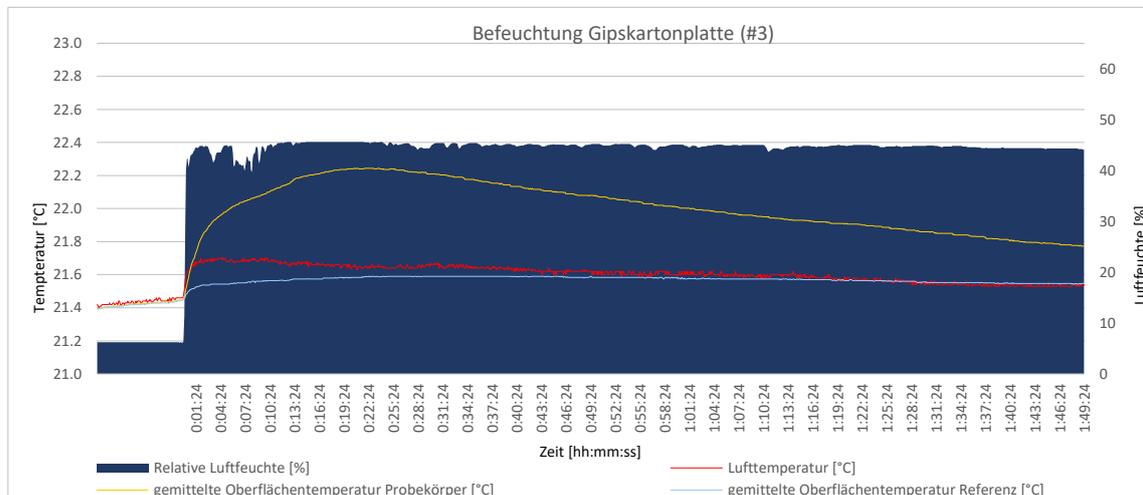


Abbildung 18 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperimentes mit Gipskartonplatte #3

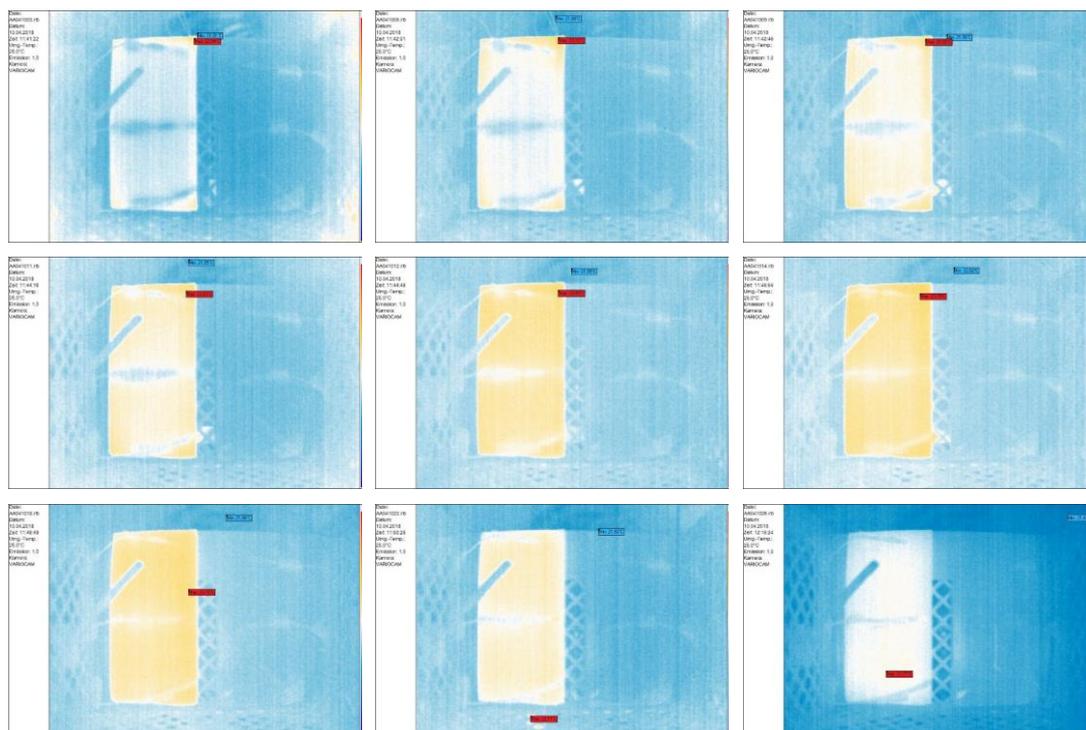
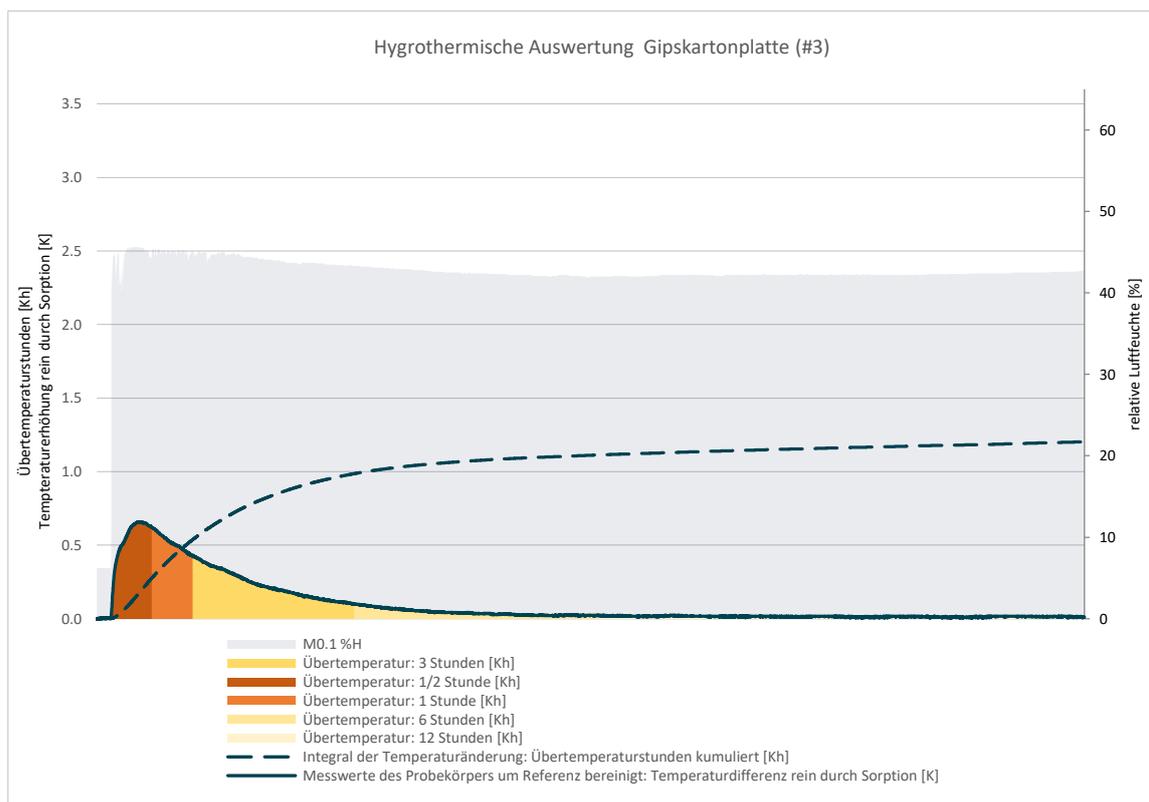


Abbildung 19 Probekörper links, Referenzkörper rechts



### Gipsfaserplatte # 4

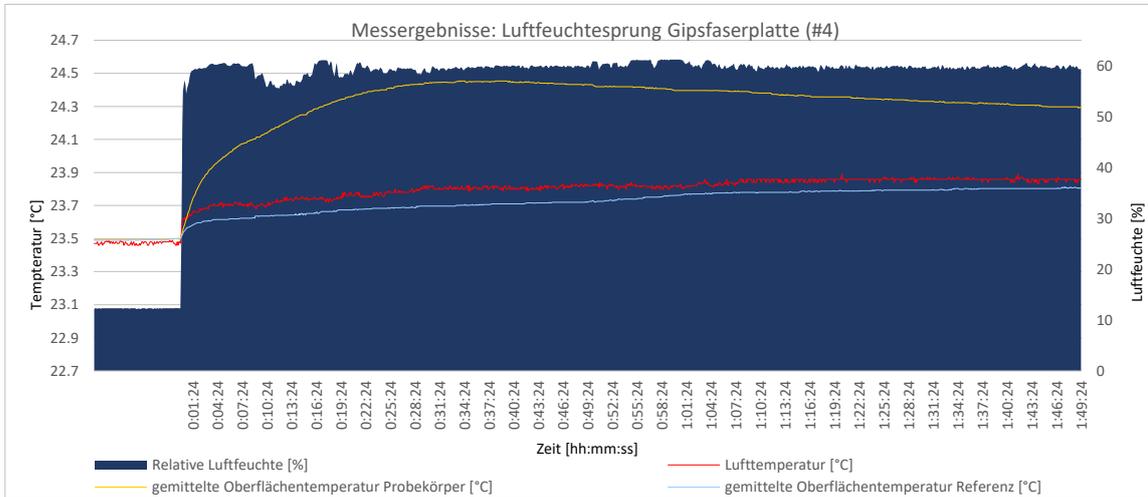


Abbildung 20 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperimentes mit Gipsfaserplatte #4

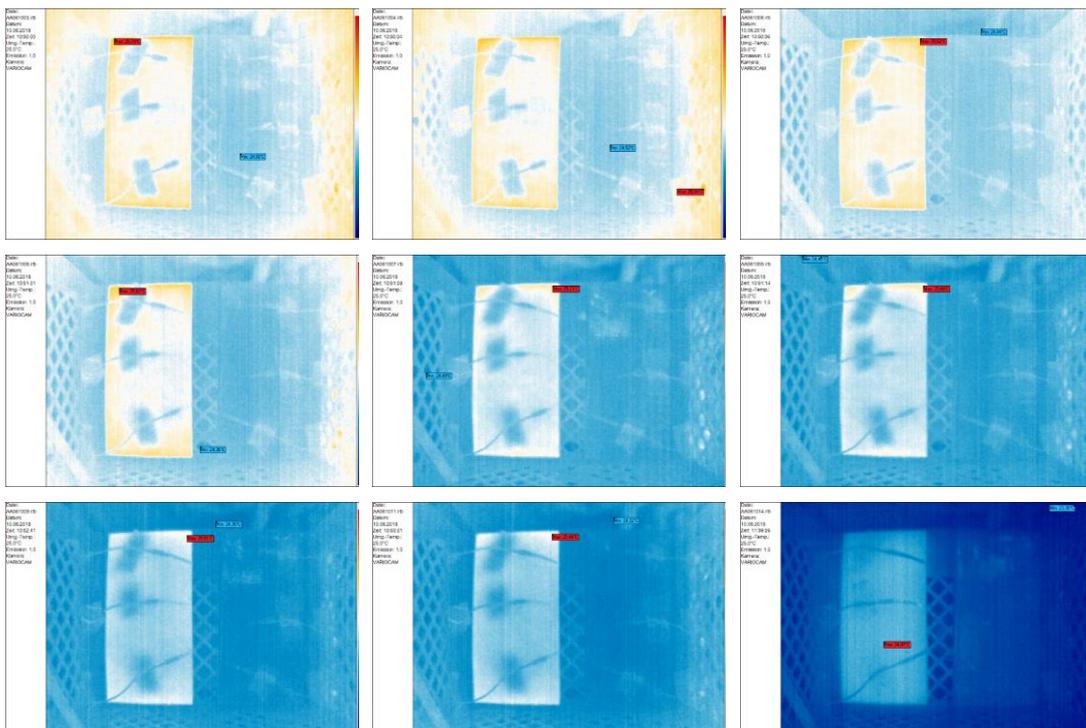
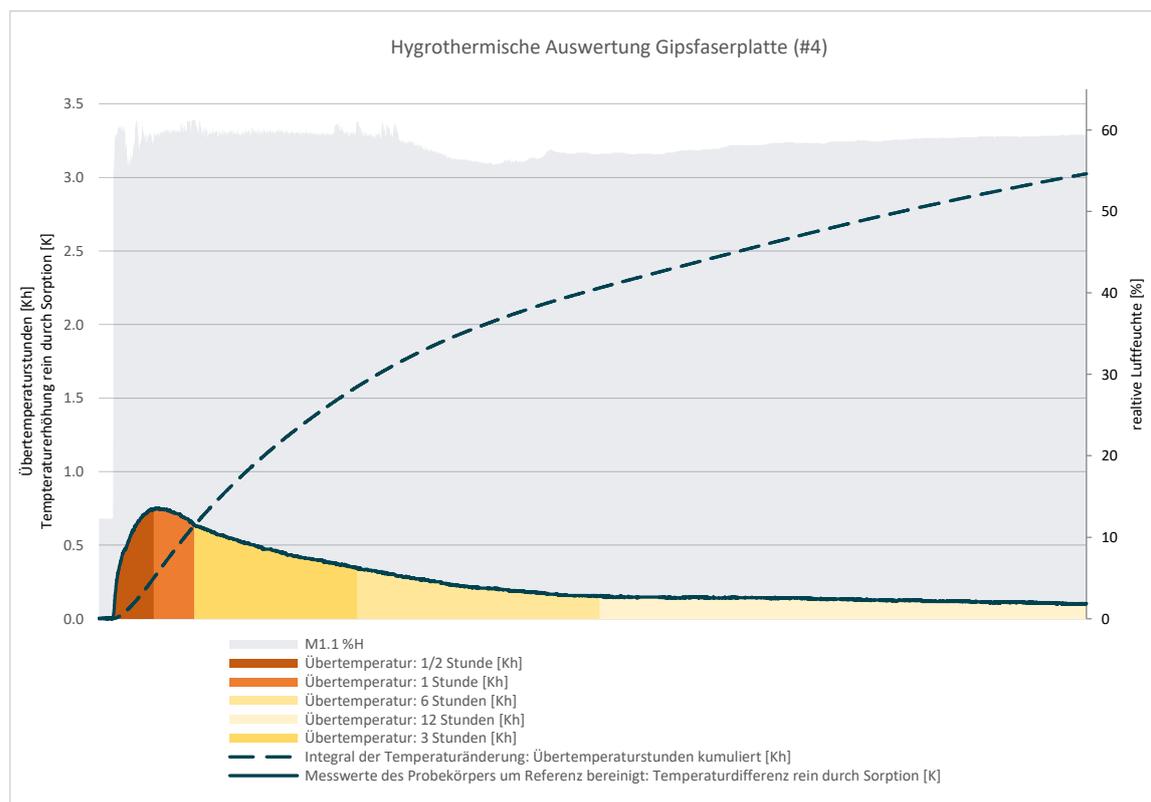
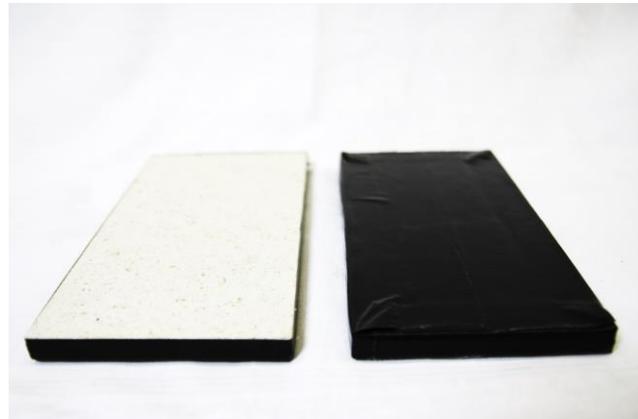


Abbildung 21 Probekörper links, Referenzkörper rechts



### Gipsfaserplatte verputzt #4 + #14

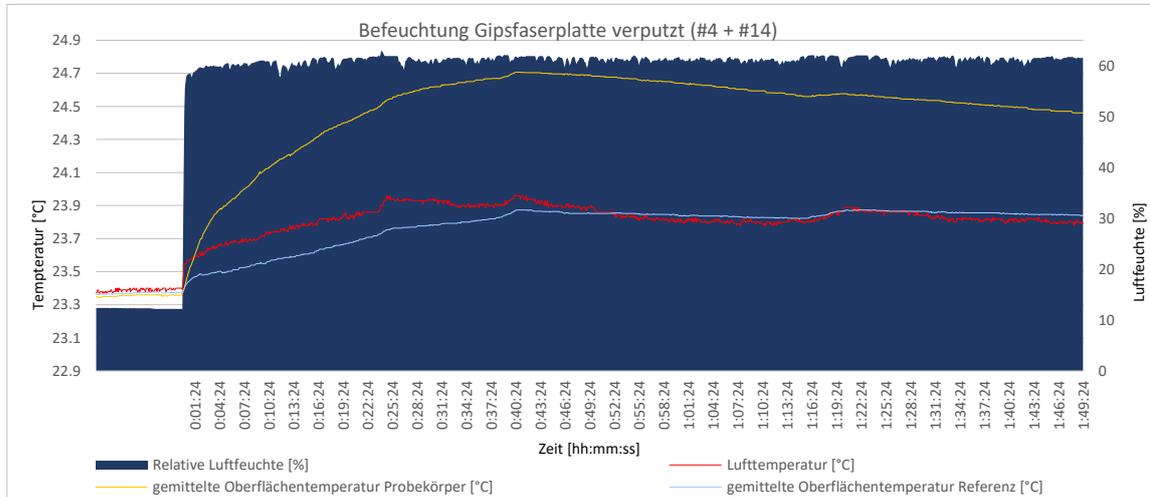


Abbildung 22 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit verputzter Gipsfaserplatte #4 + #14

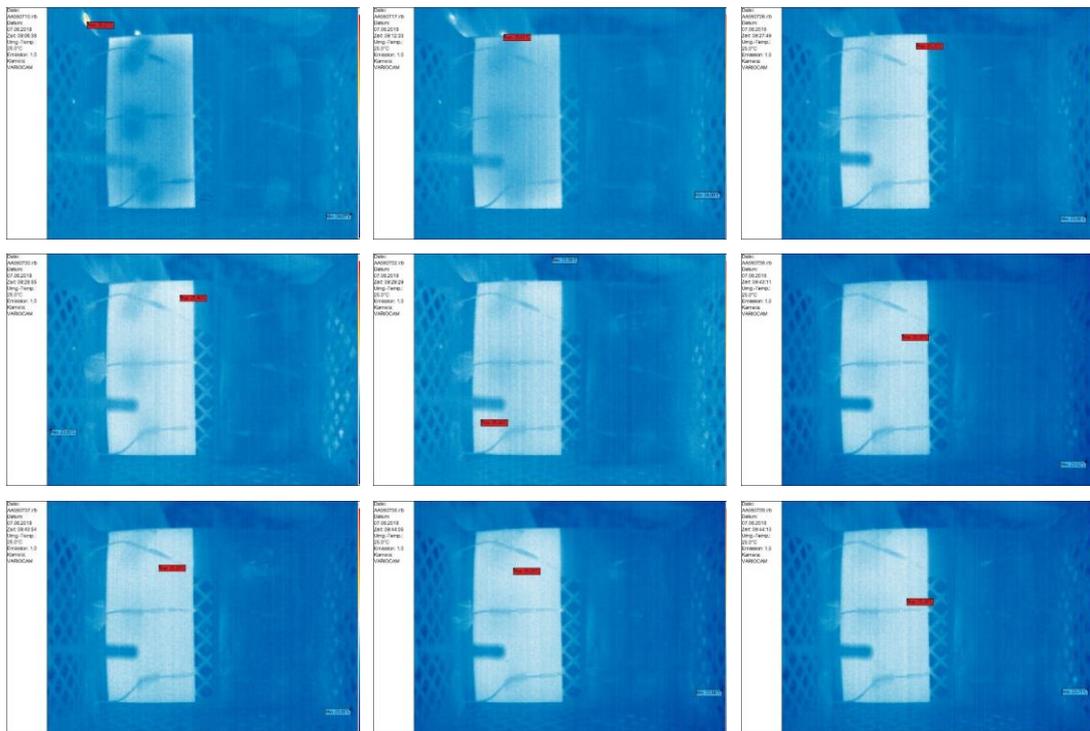
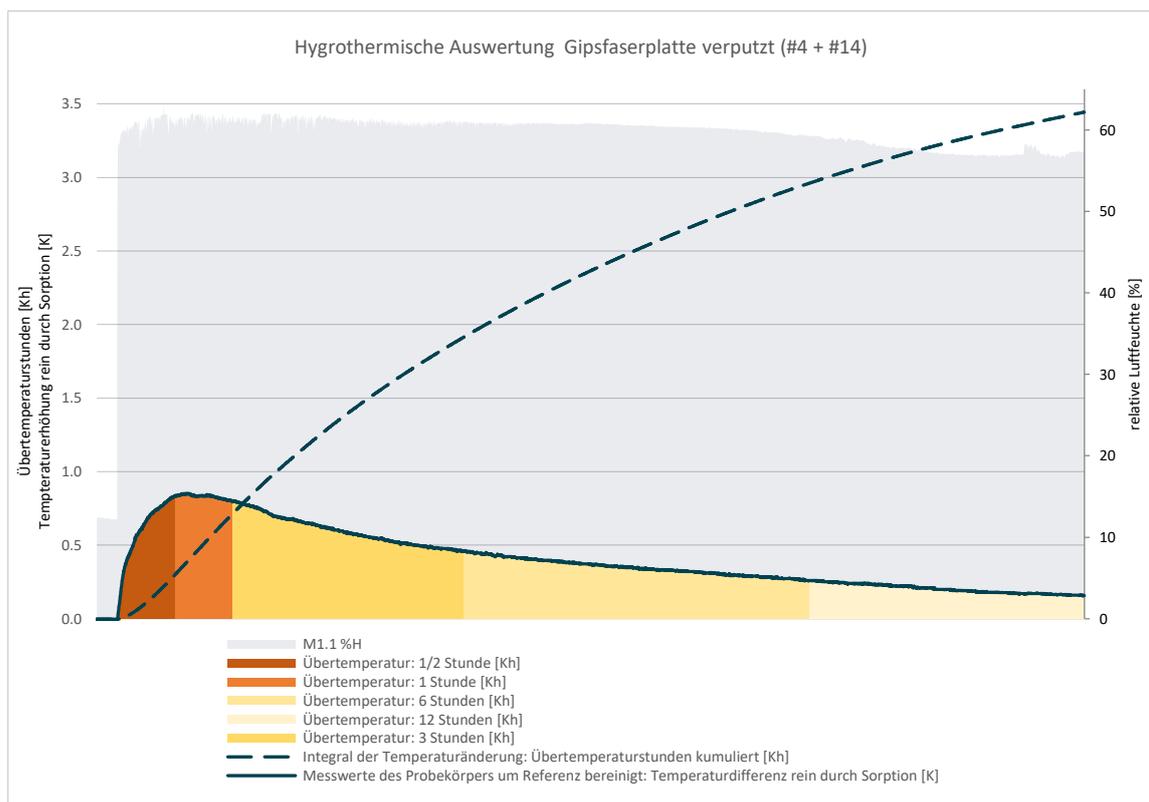
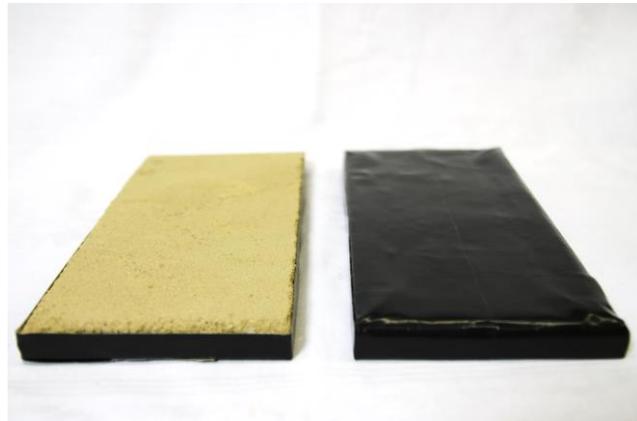


Abbildung 23 Probekörper links, Referenzkörper rechts



### Lehmbauplatte verputzt #5 + #14

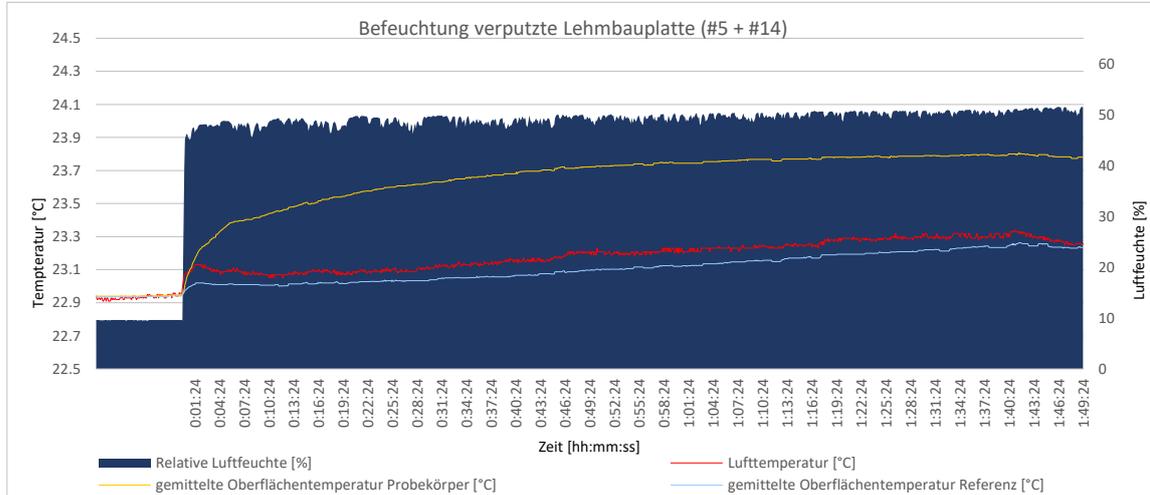


Abbildung 24 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit verputzter Lehmbauplatte #5 + #14

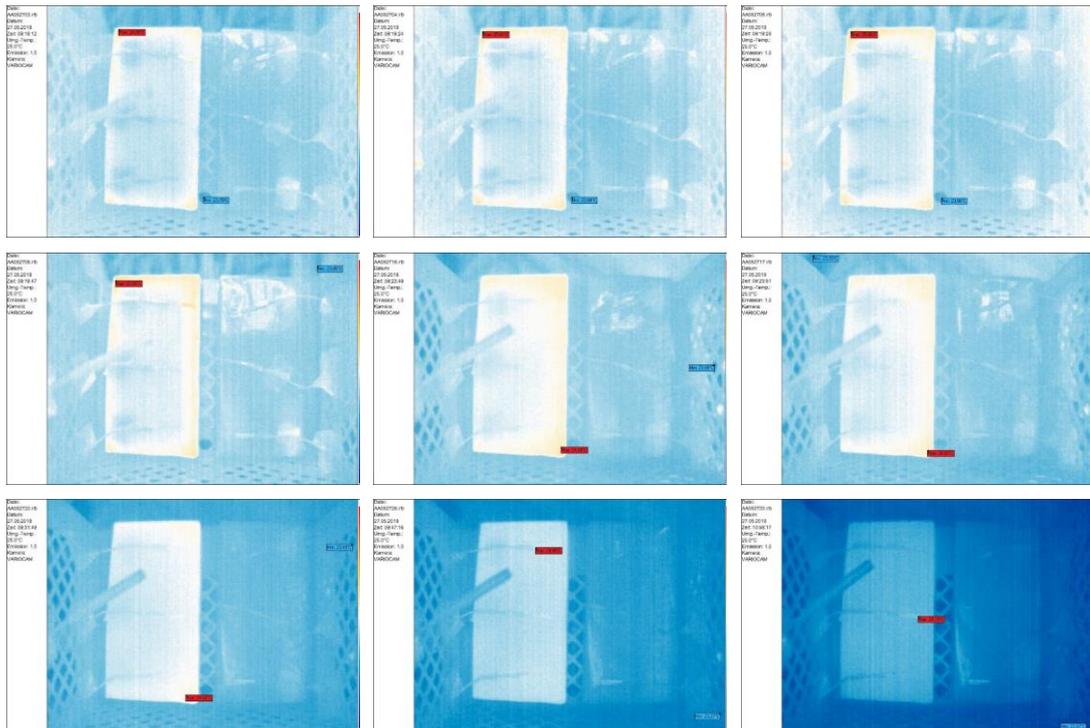
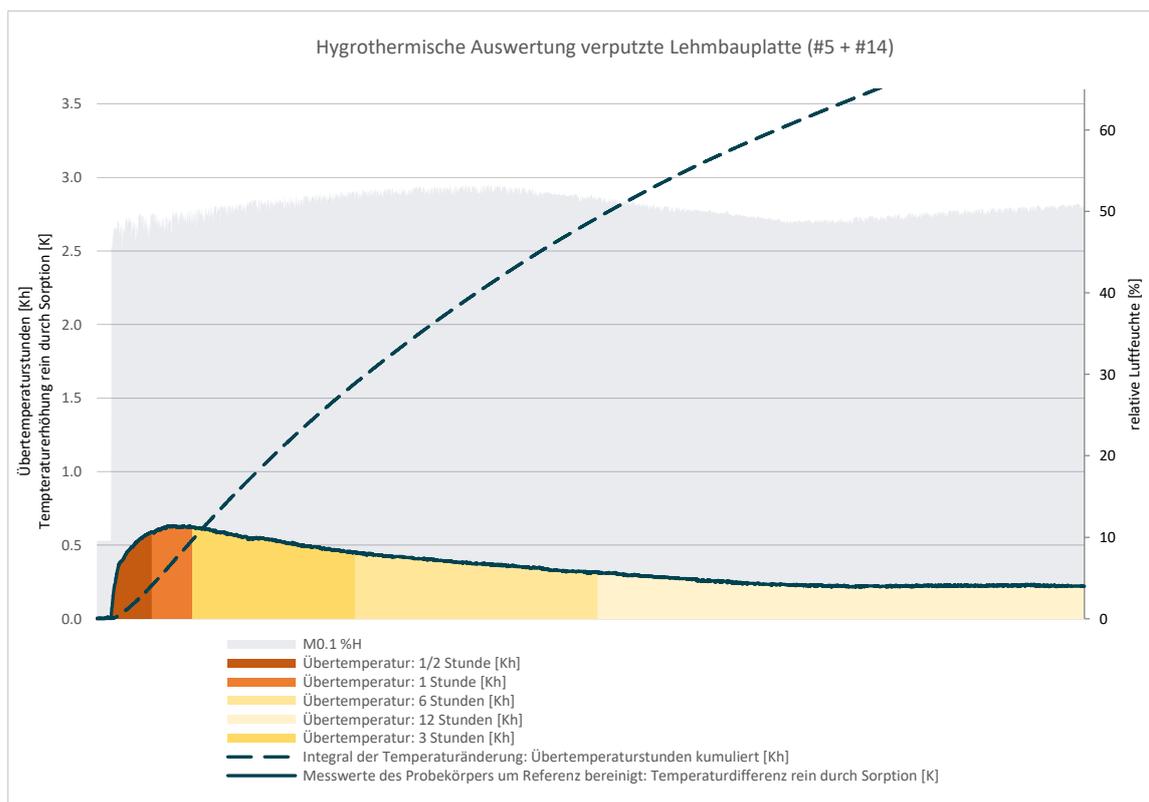


Abbildung 25 Probekörper links, Referenzkörper rechts



### Lehmbauplatte verputzt mit zusätzlichem Kalkanstrich #5 + #14 + Kalk

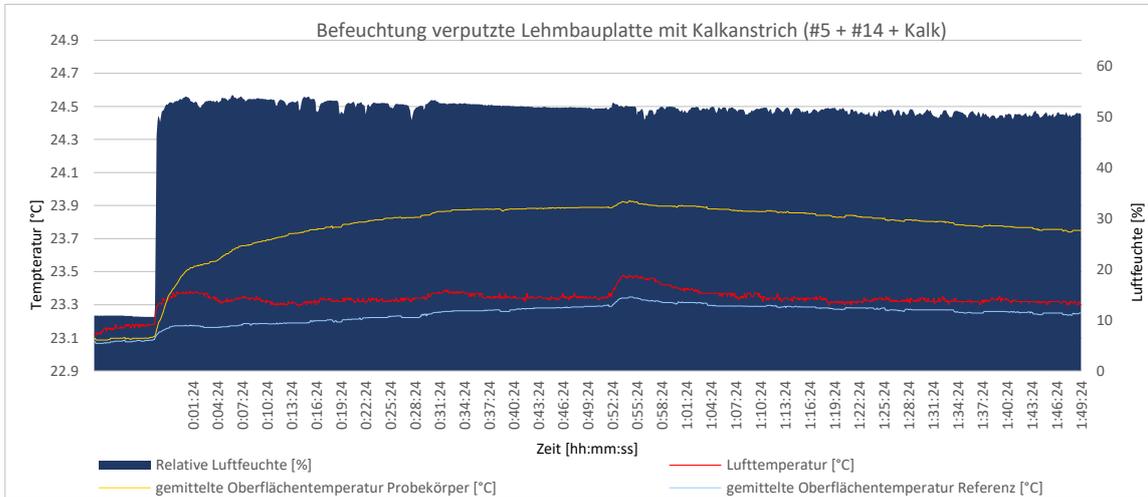


Abbildung 26 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit verputzter Gipsfaserplatte #5 + #14 + Kalkanstrich

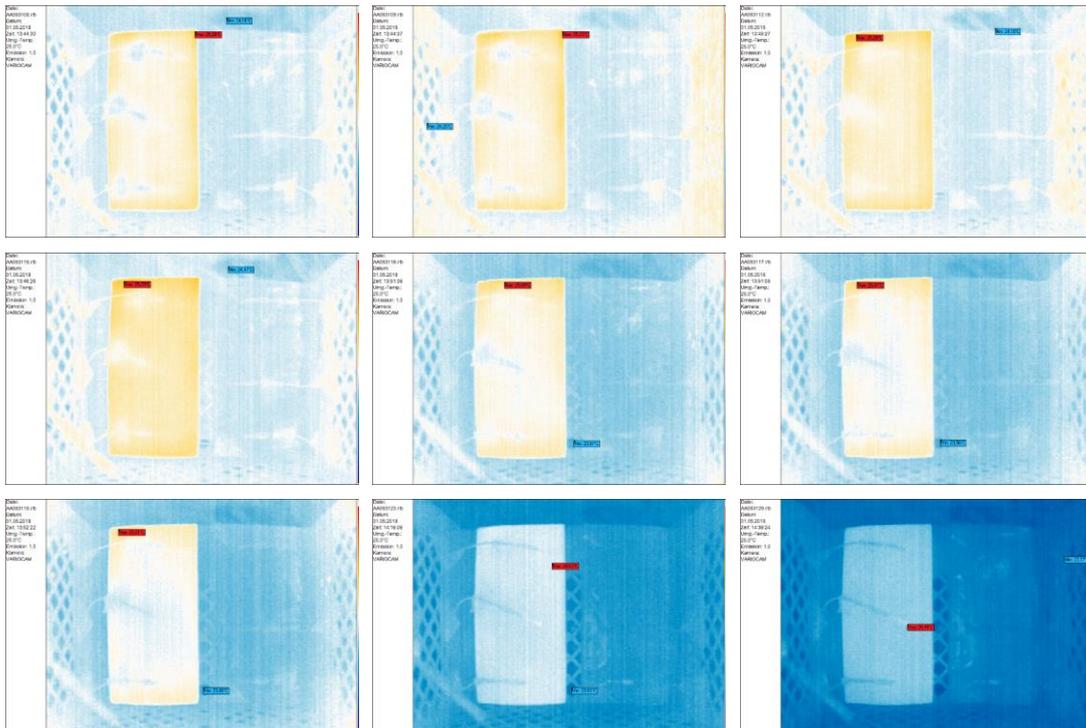
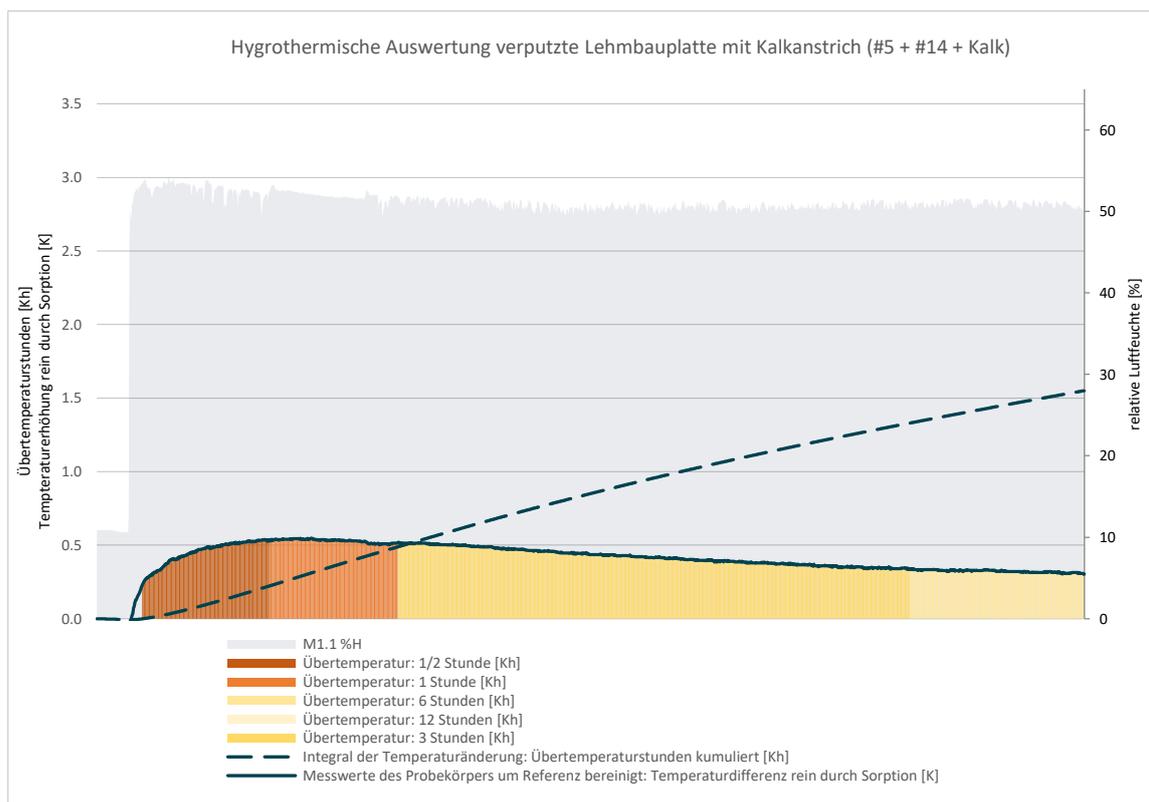


Abbildung 27 Probekörper links, Referenzkörper rechts



### Lehmbauplatte #8

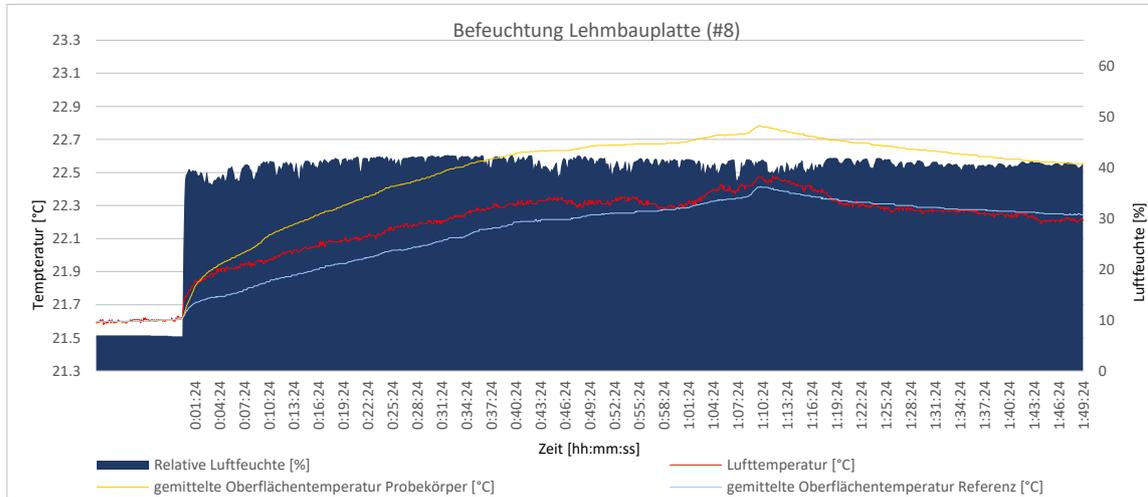


Abbildung 28 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit Lehmbauplatte #8

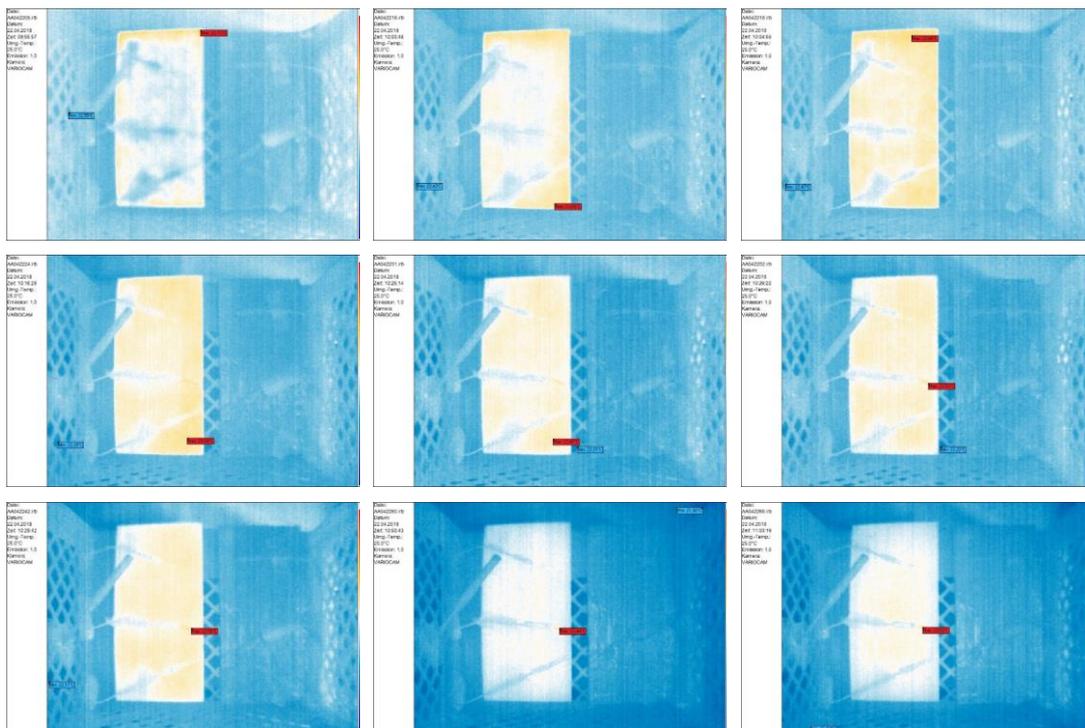
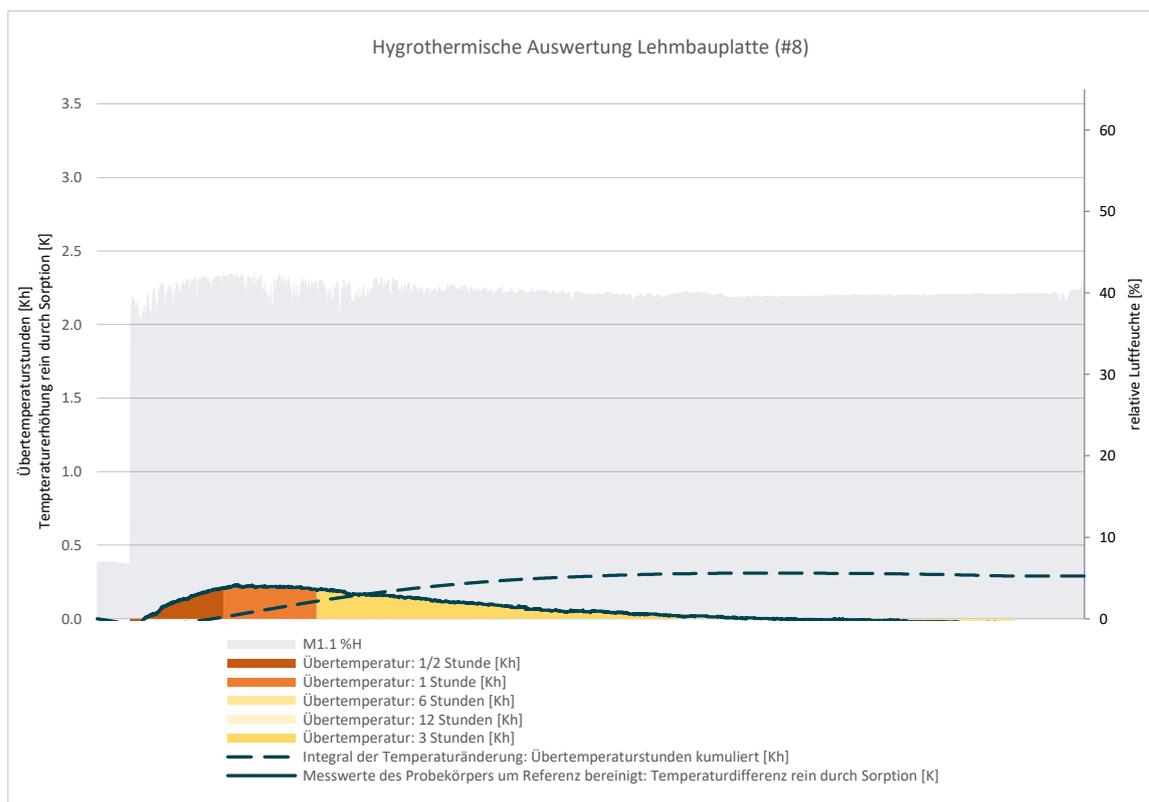
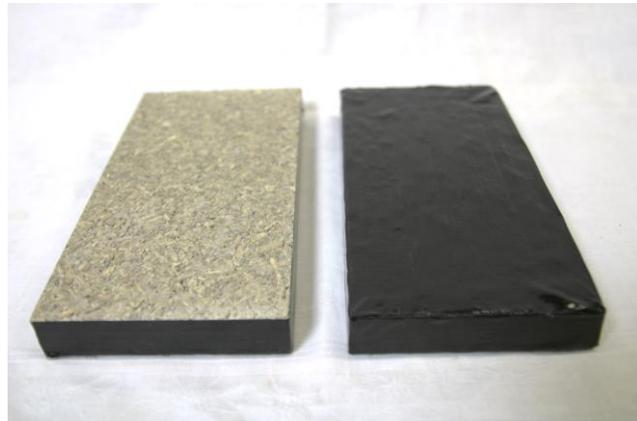


Abbildung 29 Probekörper links, Referenzkörper rechts



### Brettschichtholz tangential #9

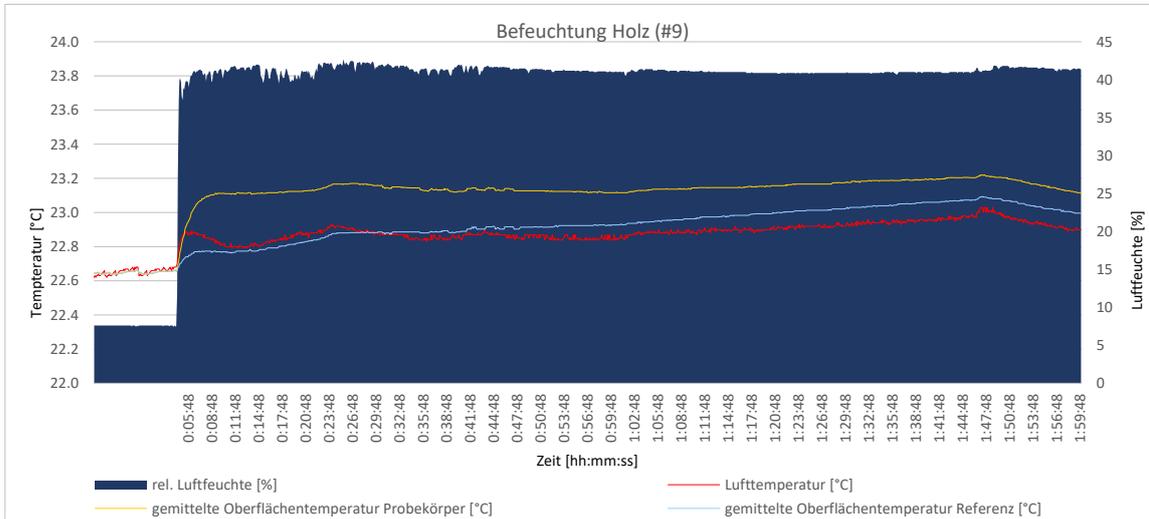


Abbildung 30 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit tangentialem Brettschichtholz #9

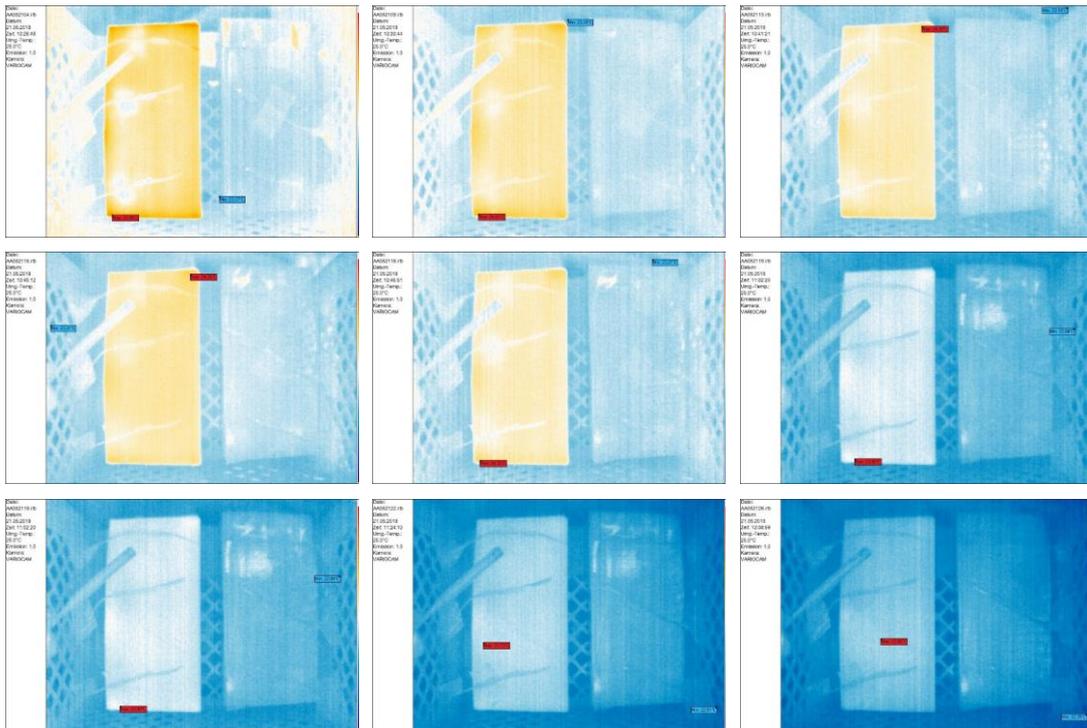
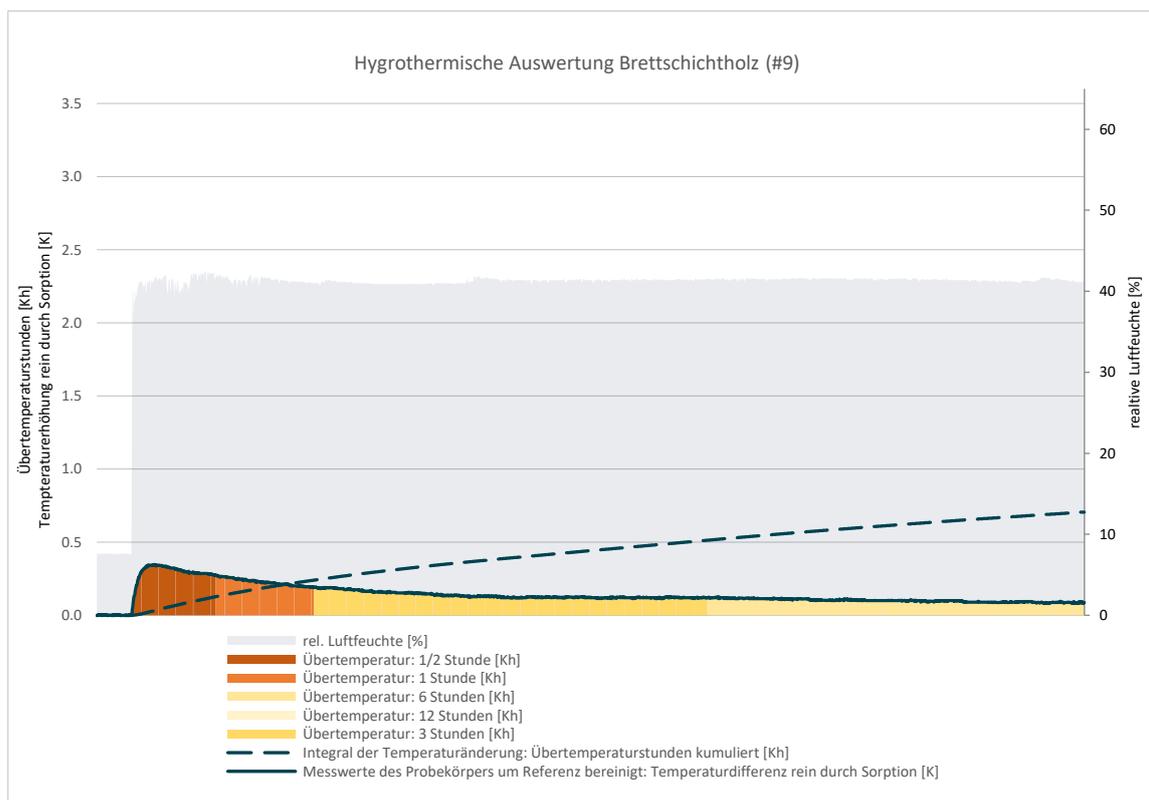


Abbildung 31 Probekörper links, Referenzkörper rechts



### Brettschichtholz quer #10

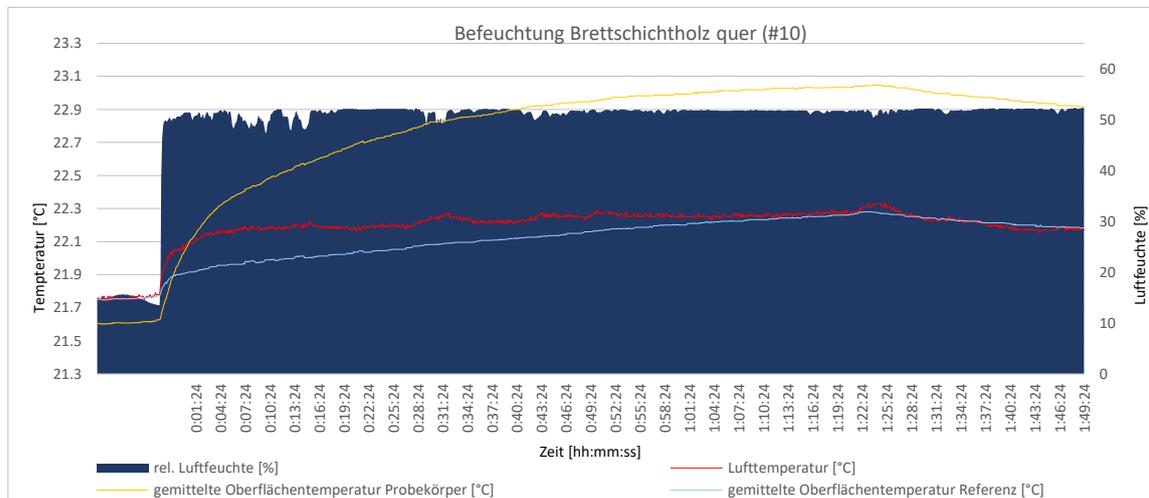


Abbildung 32 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperimentes mit stirnseitigem Brettschichtholz #10

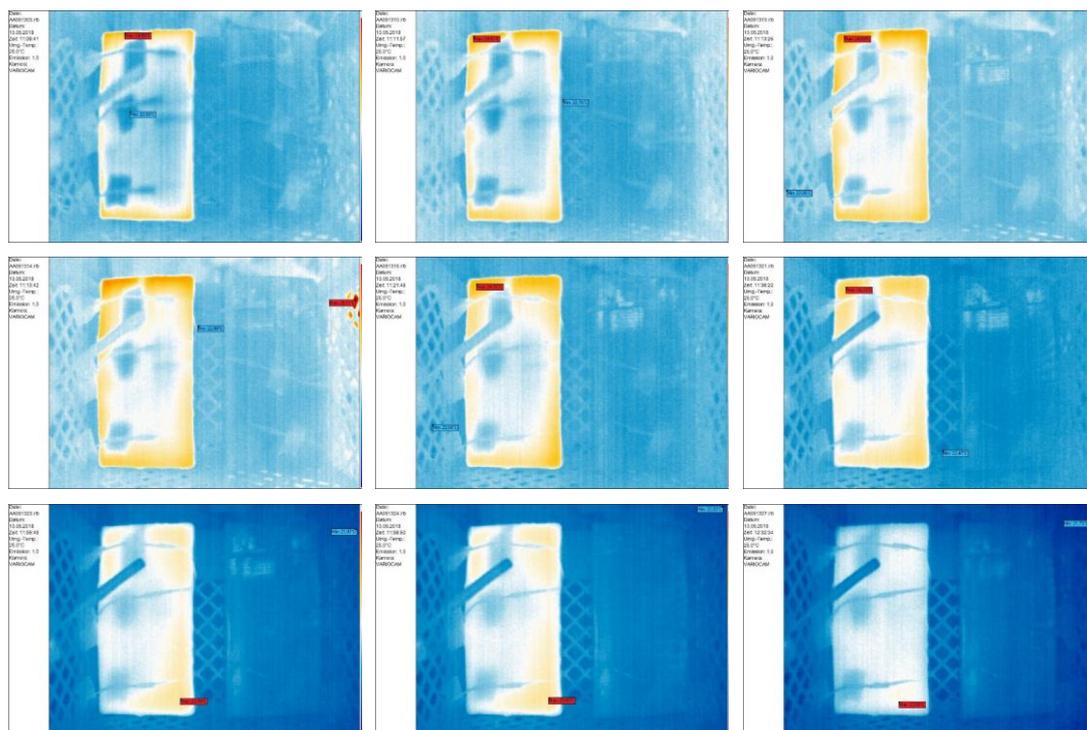
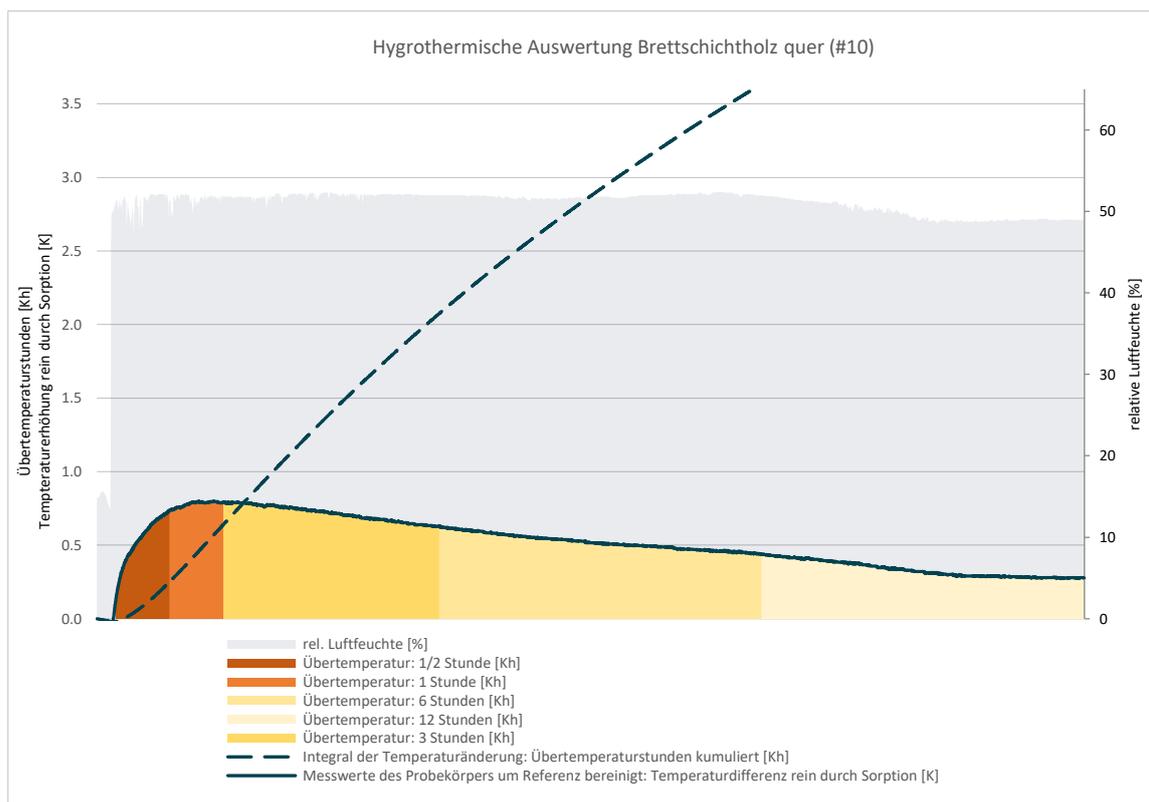


Abbildung 33 Probekörper links, Referenzkörper rechts



### Holzweichfaserplatte #13

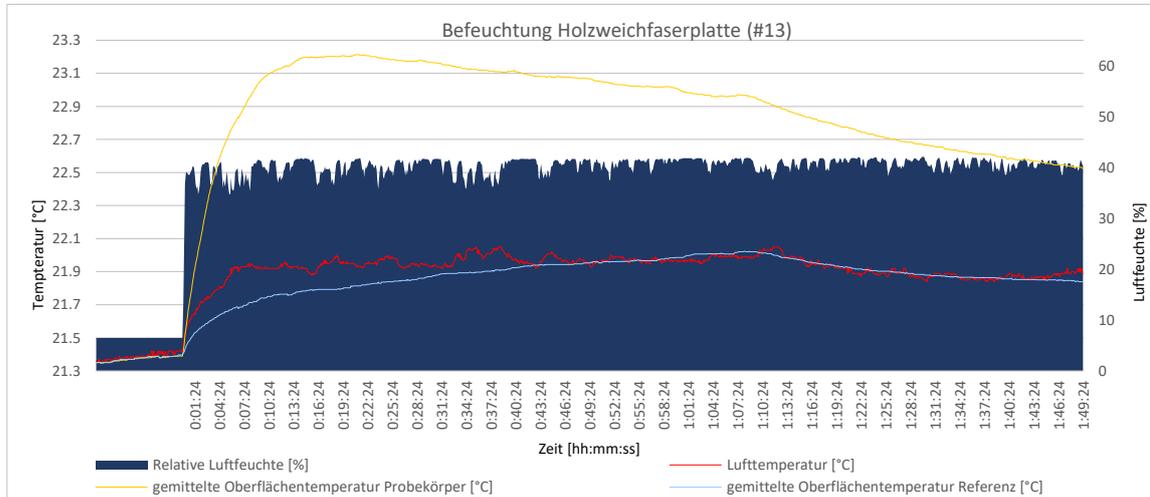


Abbildung 34 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit Holzweichfaserplatte #13

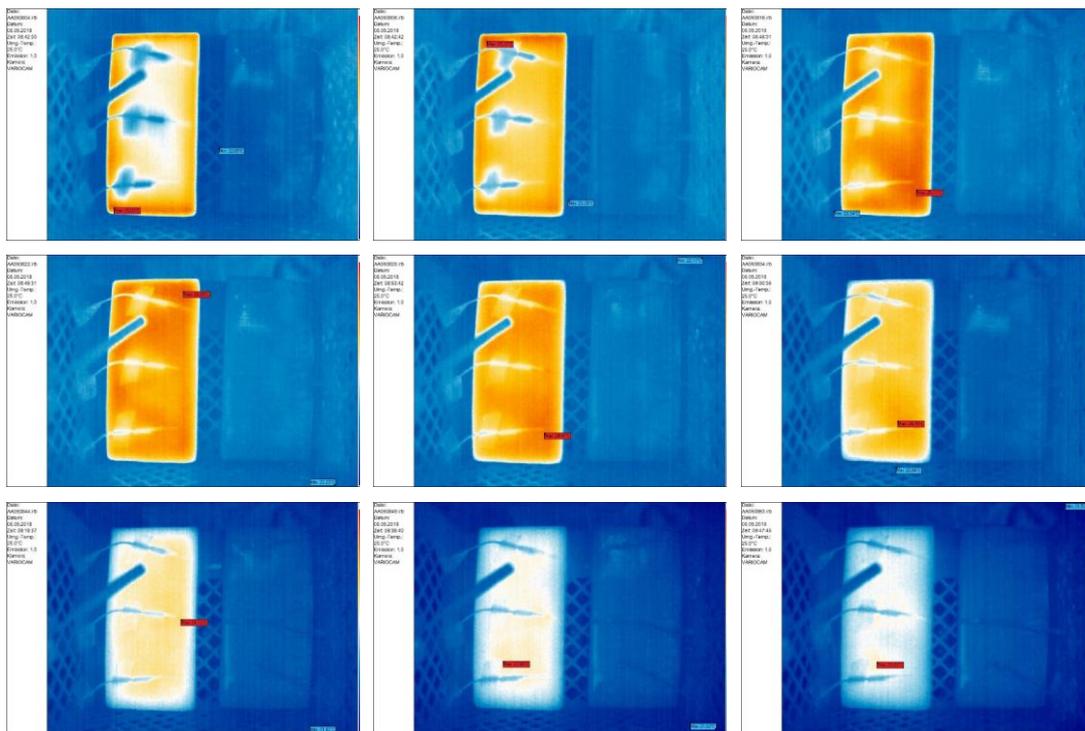
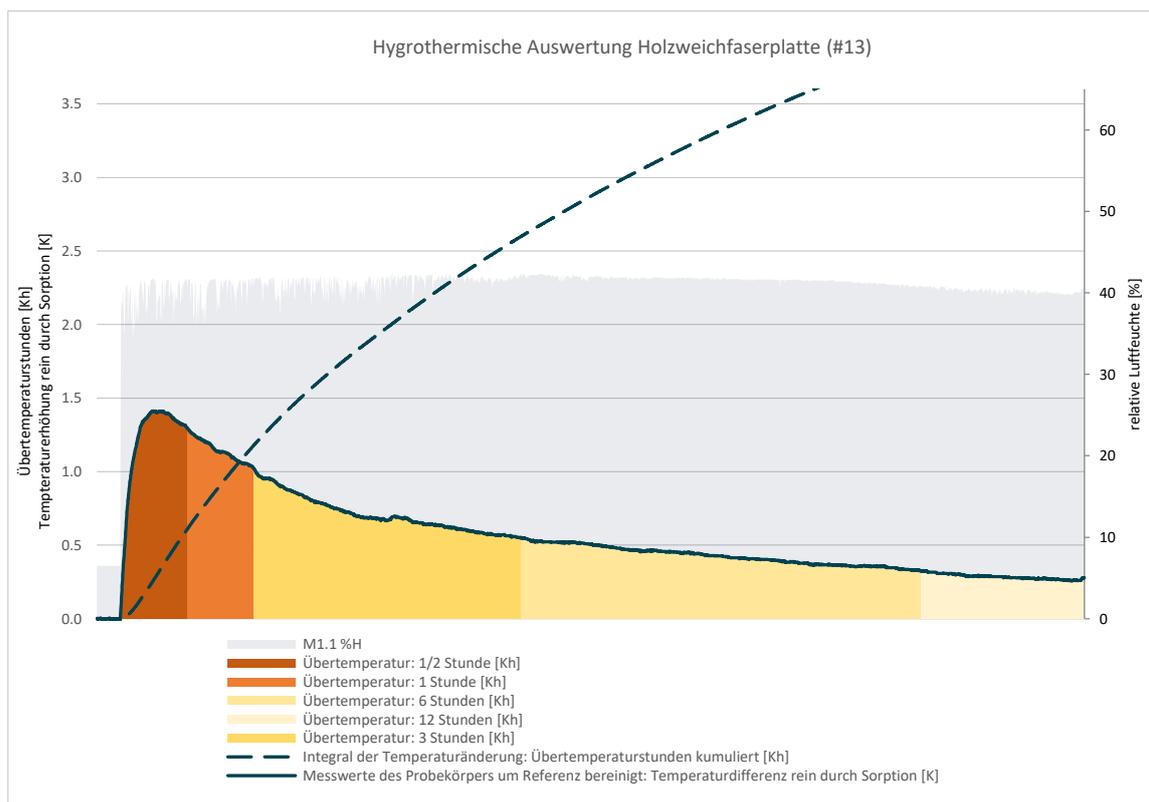


Abbildung 35 Probekörper links, Referenzkörper rechts



### Holzweichfaserplatte verputzt #13 + #14

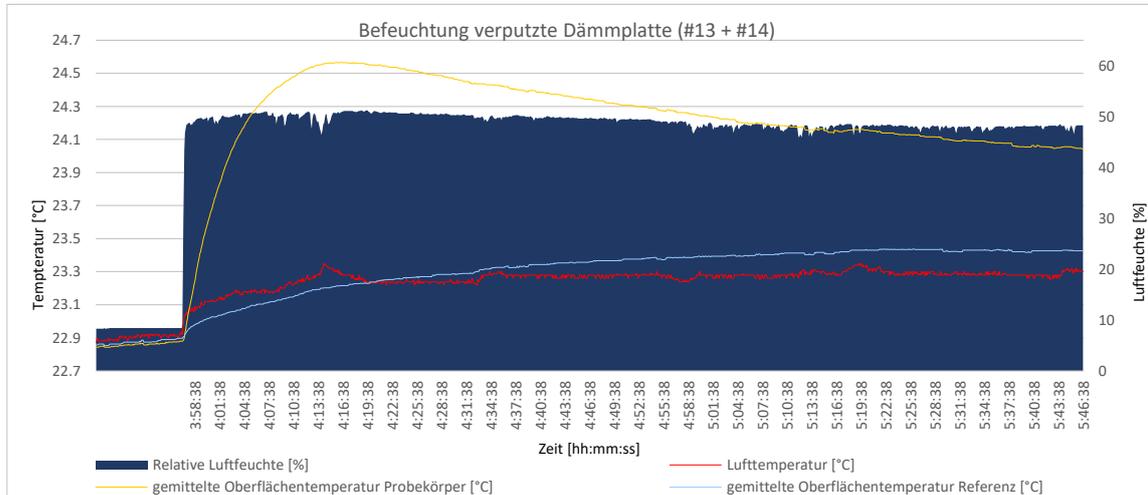


Abbildung 36 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperimentes mit lehmverputzter Holzweichfaserplatte (#13 + #14)

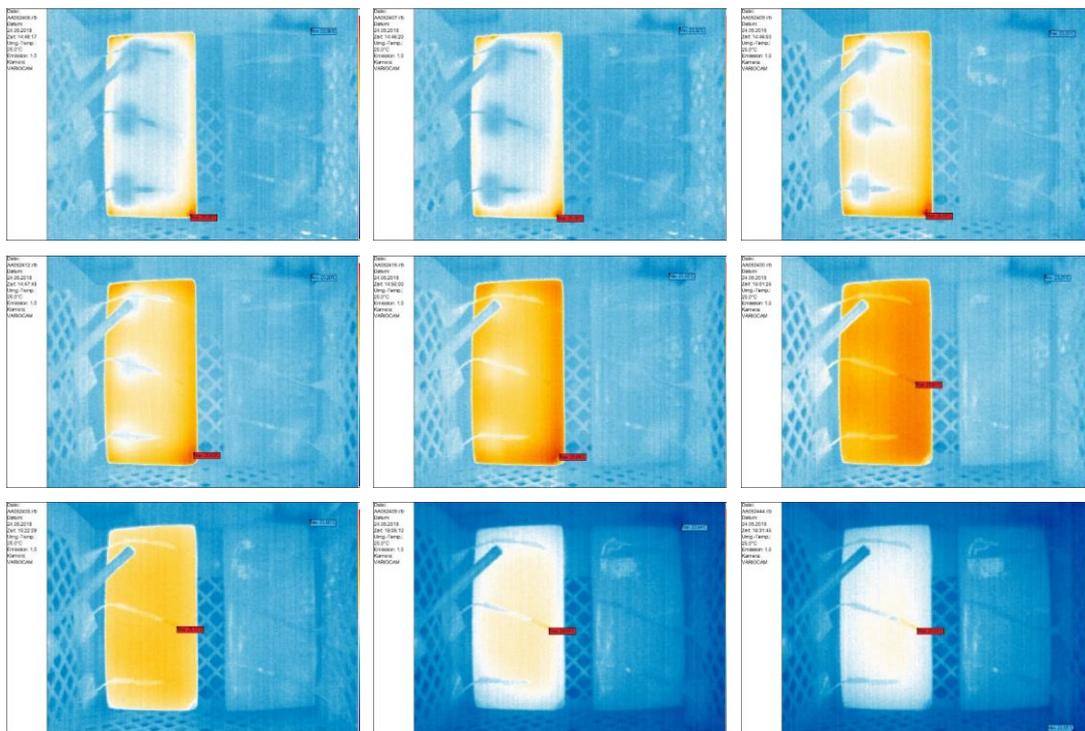
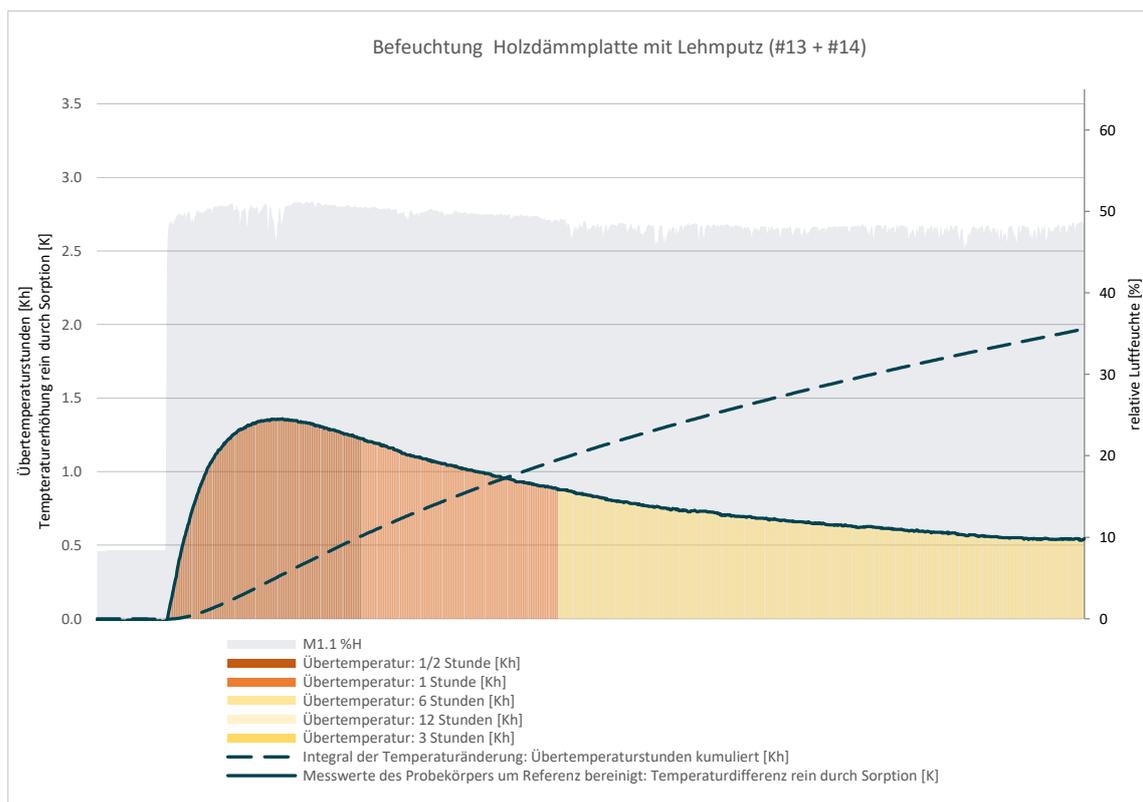


Abbildung 37 Probekörper links, Referenzkörper rechts



### Porenbetonstein #16

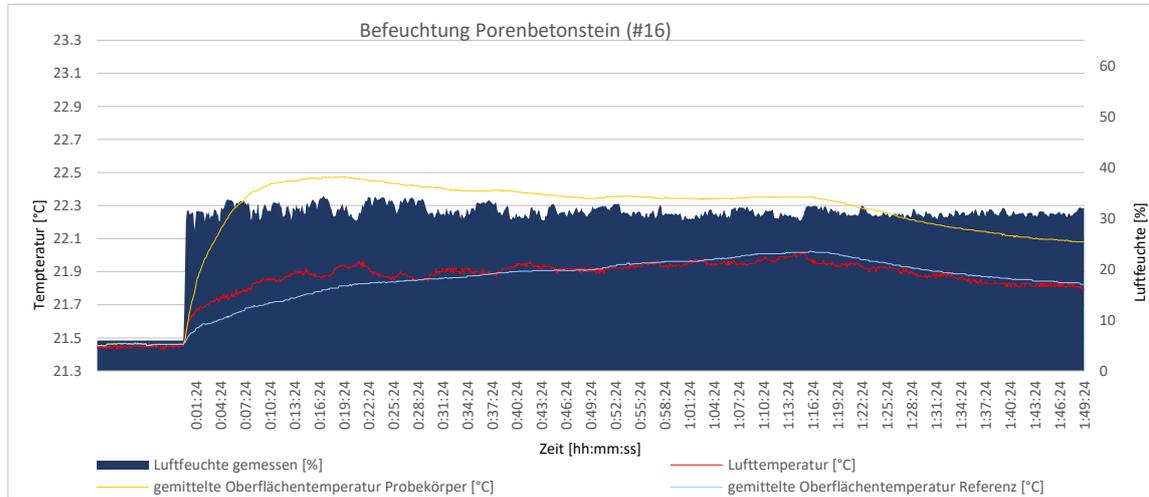


Abbildung 38 a-i: Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit Porenbetonstein #16

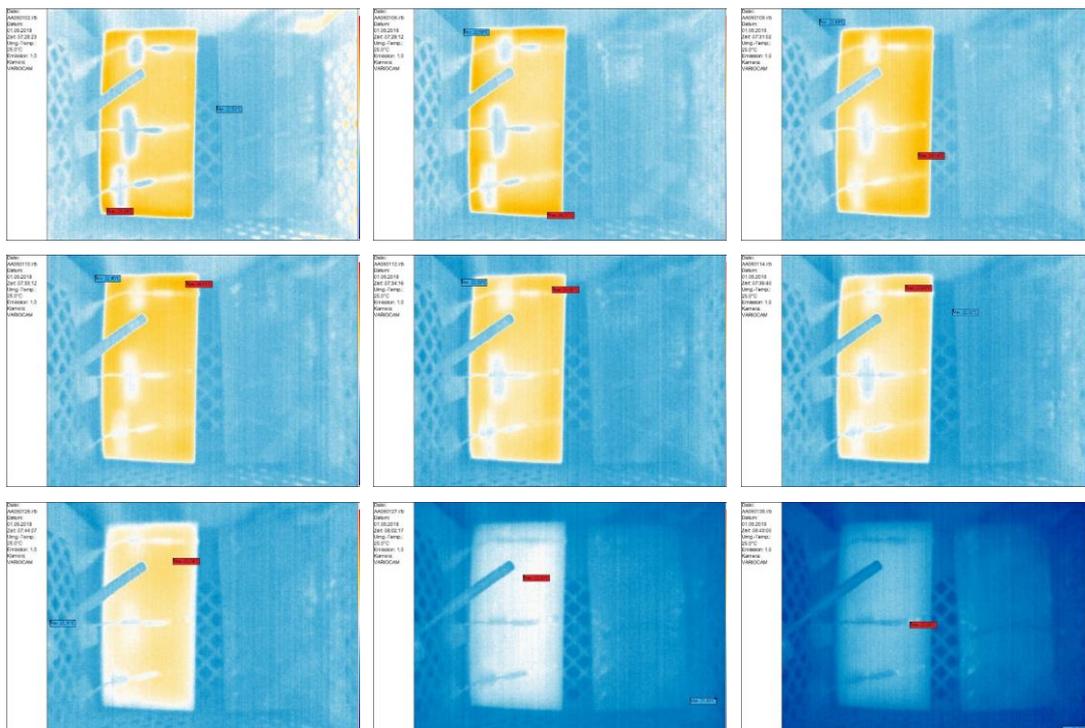
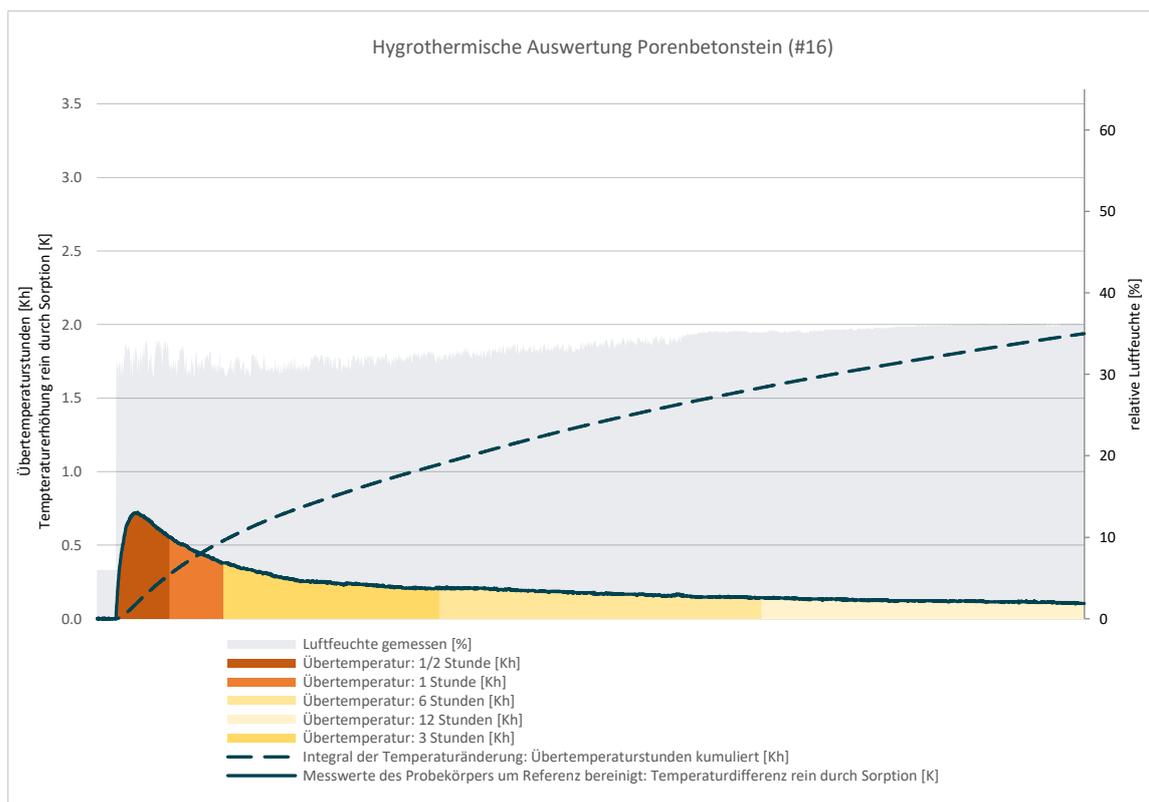


Abbildung 39 Probekörper links, Referenzkörper rechts



# Anlagen zu Kapitel IV – Planung und Einrichtung der Langzeitfeldversuche

## Details zur Messtechnik und der in Kubus Ost und West verbauten Elektrotechnik

Michael Kamml

### Auswahl des Messsystems für die Temperaturmessung

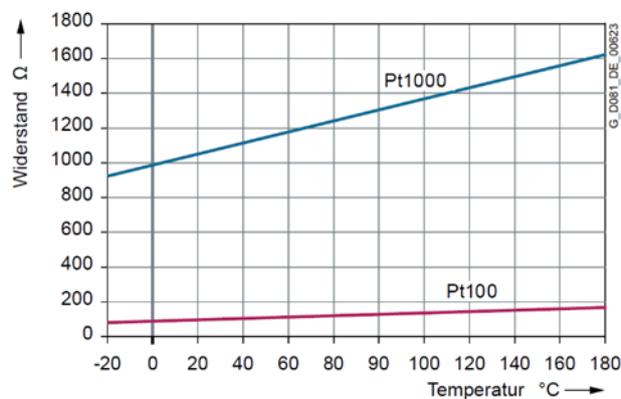
Als Anforderungen an die Temperaturmessungen ist eine hohe Genauigkeit ( $\pm 0,1$  K) sowie ein Messbereich von  $0 \dots +60$  °C festgelegt worden. Weiterhin berücksichtigt werden verschiedene Einflüsse, welche die Messungen verfälschen können. So wurde einerseits auf äußere Einflüsse geachtet und andererseits auch die verschiedenen Fehlerquellen berücksichtigt. Betrachtet wurden die folgenden Elemente.

- Sensortyp
- Leitungslängen
- Messschaltung
- Analog- Digitalwandler
- Langzeit Messverhalten
- Sensorelement Veränderung
- Wärmeeintrag durch Leitungen
- Wärmeeintrag durch Messstrom
- Bauform des Sensors und der Befestigung

### Auswahl

Bei den PT-Sensoren ist die Messgröße der elektrische Widerstand. Wie aus dem Diagramm ersichtlich, steigt die Widerstandskennlinie des PT1000 deutlich steiler an als die des PT100, was bei gleicher Temperaturdifferenz eine höhere Widerstandsänderung zur Folge hat. Bei einem höheren Widerstand ist der Stromfluss (bei gleicher Spannung) geringer, was sich positiv auf die Eigenerwärmung auswirkt.

Abbildung 40 Widerstandskennlinie Pt 1000 und Pt 100



Weiterhin betrachtet wurde die Widerstandsmessung mit Thermoelementen. Diese geben als Messgröße eine Spannung aus. Diese eignen sich für Messungen bei hohen Temperaturen oder hohen

Temperaturdifferenzen. Diese sind für das Forschungsprojekt nicht geeignet, weil diese im geforderten Temperaturbereich eine geringere Genauigkeit aufweisen.

Verbaut wurden PT1000 „Heraeus M 222, Platin-Temperatursensoren nach DIN EN 60751“ mit einer Genauigkeitsklasse F 0,1 (Klasse 1/3 B)

**Tabelle 2: DIN EN 60751:2008 S.15 Genauigkeitsklassen für Messwiderstände**

Für drahtgewickelte Widerstände		Für Schicht-Widerstände		Grenzabweichung <sup>a</sup> °C
Klasse	Gültigkeitsbereich °C	Klasse	Gültigkeitsbereich °C	
W 0,1	-100 bis +350	F 0,1	0 bis +150	$\pm (0,1 + 0,0017  t )$
W 0,15	-100 bis +450	F 0,15	-30 bis +300	$\pm (0,15 + 0,002  t )$
W 0,3	-196 bis +660	F 0,3	-50 bis +500	$\pm (0,3 + 0,005  t )$
W 0,6	-196 bis +660	F 0,6	-50 bis +600	$\pm (0,6 + 0,01  t )$

<sup>a</sup> |t| = Betrag der Temperatur in °C ohne Berücksichtigung des Vorzeichens.

Quelle: (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2009, p. 12)

**Tabelle 3: Angaben für Berechnungen des Leitungswiderstands**

Formelzeichen	Bezeichnung	Rechenwert	Einheit	Quelle
$\rho$	spezifischer Widerstand	0,0178	$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	(Bastian et al., 2008, p. 38)
$l$	Leitungslänge	2 x 5 m	m	
$A$	Leitungsquerschnitt	2 x 0,22 mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	
TK	Temperaturkoeffizient	3850 ppm/K	ppm/K	(Heraeus, 2019, p. 1)
$R_0$	Widerstand bei 0 °C	1000 $\Omega$	$\Omega$	
$R$	Widerstand		$\Omega$	

Der Leitungswiderstand durch die Leitung berechnet sich nachfolgender Formel:

$$R = \rho * \frac{l}{A}$$

$$R = 0,0178 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} * \frac{10 \text{ m}}{0,22 \text{ mm}^2}$$

$$R = 0,81 \Omega$$

Messsystem mit: PT1000 und T=20 °C

Aus Kennlinie PT1000 +10 °C 1039,00 Ohm

+20 °C 1077,90 Ohm

$$\Delta T = \frac{R_{Leitung}}{TK \cdot R_0} * R_{Leitung}$$

$$\Delta T = \frac{0,81 \Omega}{3850 \frac{ppm}{K} \cdot 1000 \Omega}$$

$$\Delta T = 0,21 \text{ K}$$

Aus der Berechnung wird deutlich, die Abweichung durch den Leiterwiderstand ist nicht zu vernachlässigen. Konstante Temperaturabweichung. → Möglichkeit der Kalibrierung, der Berechnung und Korrektur der Messwerte oder Auswahl einer geeigneten Messschaltung.

### Messschaltung

Als mögliche Messschaltung gibt es die zwei, drei oder Vierleiterschaltung. Bei der Zweileiterschaltung sind die Leitungswiderstände vollständig im Messwert enthalten. Zudem wirken sich Temperaturänderungen der Leiter auch auf das Messergebnis aus. Bei der Dreileiterschaltung wird eine Leitung durch eine gemeinsame Zuleitung eingespart. Dies ist insbesondere bei großen Kabellängen wichtig. Bei der Vierleiterschaltung werden durch eigene Messleitungen und einem nahezu gegen unendlich gehenden Innenwiderstands des Messgeräts die Einflüsse der Leitungswiderstände vollständig ausgeschlossen (Bergmann, 1996, pp. 359–361).

Gewählt wurde eine Vierleiterschaltung, um individuelle Kompensationsrechnungen des Leitungswiderstands zu vermeiden.

### Analog Digitalwandler

Ausgewählt: Tinkerforge PTC Bricklet 2.0. Unterstützt werden Pt 100 und Pt 1000 Sensoren mögliche Messschaltungen Typ zwei, drei oder Vierleiter. Als Wandler wird ein MAX3186 eingesetzt.

Tabelle 4: Daten des Analog Digital Wandlers

Eigenschaft	Wert	Auswirkung
Auflösung	15 Bit	0,03125 °C
Genauigkeit	0,05 % auf voller Skala	max. +- 0,5 °C

Quelle: (Maxim Integrated, 2015, pp. 1–3)

Fehler durch lineare Anpassung in dem Converter: Wird im Converter linear approximiert, dann berechnet sich der Fehler aus Differenz zwischen dem linearen Graph und dem durch die Callendar-Van Dusen Gleichung definierten Verlauf:

$$R(T) = R_0(1 + aT + bT^2 + c(T - 100)T^3)$$

$$R(60\text{ C}) = 1000 \cdot (1 + 3,90830 \cdot 10^{-3} \cdot 60 + -5,77500 \cdot 10^{-7} \cdot 60^2 + 0 \cdot (T - 100)T^3)$$

$$R(60\text{ C}) = 1232,419\ \Omega$$

$$a = 3.90830 \times 10^{-3}$$

$$b = -5.77500 \times 10^{-7}$$

$$c = -4.18301 \cdot 10^{-12} \text{ wenn } -200^\circ\text{C} \leq T \leq 0$$

$$c = 0 \quad \text{wenn } 0^\circ\text{C} \leq T \leq 850^\circ\text{C}$$

Formel für lineare Approximation mit dem Temperaturkoeffizienten aus dem Datenblatt von 3850 ppm/K.

$$R(T) = 1000 + 3850 \cdot \frac{\text{ppm}}{\text{K}} \cdot T$$

$$R(60) = 1000 + 3850 \cdot \frac{\text{ppm}}{\text{K}} \cdot 60\text{K}$$

$$R(60) = 1231\ \Omega$$

Durch die Differenz zwischen der Linearen- und der Van Dusen-Gleichung: Bei 60 °C würde ein Fehler von 0,37 K (1,412 Ω) entstehen.

Da der Fehler der Umrechnung relevant ist, wurde hier weiter recherchiert. Bei dem Auslesen des Grundprogramms auf dem PTC Bricklet kann festgestellt werden, dass die Umrechnung mit einer „lookup table“ und einer linearen Interpolation zwischen den einzelnen Zwischenwerten erfolgt. Auch den Abweichungen im Referenzwiderstand (390 Ω bzw. 3900 Ω) wird Rechnung getragen. Eine Verfälschung der Messwerte ist hier nicht zu erwarten bzw. nicht relevant (O. Lüke, personal communication; Olaf Lüke, 2018). Des Weiteren sind systematische Abweichungen durch die Kalibrierung auf eine festgelegte Referenztemperatur eliminiert.

### Langzeit Messverhalten

Veränderung des Sensorelements durch Alterung: Aus dem Datenblatt des Herstellers ist zu entnehmen, dass die Langzeitstabilität bei 0,04 % ( $R_0$  Drift) nach 1000 h bei maximaler Betriebstemperatur von 500 °C liegt. Es ist anzunehmen, dass die Änderung für die Messung unerheblich ist. Durch den erwarteten moderaten Temperaturbereich von max. - 10 °C bis + 60 °C. Aus dem Maximaldrift würde ein Fehler bei 60 °C von <0,024 K entstehen. Annahme: Keine nennenswerten Veränderungen der Leitungen und des AD Wandlers über einen Zeitraum von zwei Jahren.

## Einfluss

### Wärmeeintrag durch Leitungen

Der Wärmeeintrag durch die Leitungen zur Messstelle muss ebenfalls berücksichtigt werden. Neben der Verlegung der Leitungen entlang der Isothermen kann auch mit der Reduzierung der Leitungen selbst der Fehler reduziert werden.

Durch den minimalen Übergang von Messleitung auf Sensor (Querschnitt Sensoranschluss 0,03 mm<sup>2</sup>) wird der Einfluss vernachlässigt.

### Selbsterwärmung durch Messstrom

Fehler durch Erwärmung des Sensors durch den Messstrom: Der Messstrom und die am Sensor anliegende Spannung wurde bei laufender Messung mit einem Keithley 6517B Electrometer erfasst. Die Messwerte sind Mittelwerte aus je fünf Messungen und in Tabelle 4 erfasst. Berechnungen mit Werten des PTC 2.0 Bricklet und den Angaben des verwendeten Pt 1000 Sensors.

Tabelle 5: Messwerte für Wärmeeintrag durch Messstrom

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung	Rechenwert
$U$	V	Spannung	0,419 V
$I$	A	Strom	0,0003822 A
$T$	°C	Temperatur	23,3 °C

Im Datenblatt des Sensors ist die Selbsterwärmung mit 0,4 K/mW bei 0 °C angegeben

Die Erwärmung selbst berechnet sich dann wie folgt:

$$\Delta\vartheta = 0,4 \frac{\text{K}}{\text{mW}} \cdot P$$

$$\Delta\vartheta = 0,4 \frac{\text{K}}{\text{mW}} \cdot 0,419 \text{ V} \cdot 0,0003822 \text{ A} \cdot \frac{1000 \text{ mW}}{1 \text{ W}}$$

$$\Delta\vartheta = +0,064 \text{ K}$$

Eigenerwärmung/Joulesche Erwärmung

Die Stromwärmeverluste berechnen sich nach dem Stromwärmegesetz:

Formeln aus (Bastian et al., 2008, p. 47).

Tabelle 6: Berechnung Erwärmung des Sensors Daten aus Datenblatt (Heraeus, 2019)

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung	Rechenwert
$Q_w$	J oder Ws	Wärmeenergie	
$P$	W	Leistung	
$t$	s	Zeit	1 s
$m$	kg	Masse	0,00001 kg*
$\rho$	$\frac{g}{cm^3}$		$21,5 \frac{g}{cm^3}$
$c$	$\frac{J}{kg \cdot K}$	Spezifische Wärmekapazität Platin	$133 \frac{J}{kg \cdot K}$
$\Delta\vartheta$	K	Temperaturdifferenz	

$$Q_w = P \cdot t$$

$$P = U \cdot I$$

$$Q_w = 0,419 V \cdot 0,0003822 A \cdot 1 s$$

$$Q_w = 1,601 \cdot 10^{-4} Ws$$

- $$\Delta\vartheta = \frac{Q}{m \cdot c}$$

$$\Delta\vartheta = \frac{1,601 \cdot 10^{-4} J}{1 \cdot 10^{-3} cm^3 \cdot 21,5 \frac{g}{cm^3} \cdot 133 \frac{J}{kg \cdot K} \cdot \frac{1 kg}{1000 g}}$$

$$\Delta\vartheta = +0,056 K$$

\*Annahme aus Dichte 21,5 g/cm<sup>3</sup> \* Abmessungen

Zeit wurde aufgerundet (0,8 Sek. für 40 Messungen)

Quelle: Dichte / spezifische Wärmekapazität Platin (Grigull & Sandner, 1990, p. 148)

Beide der berechneten Werte liegen in einem akzeptablen Bereich.

Zur Begrenzung der Selbsterwärmung wird zusätzlich über die Software das Bricklet bzw. die Messung abgeschaltet, sodass die Messspannung nur anliegt, wenn auch gemessen wird. Des Weiteren wird dieser systematische Messfehler auch durch die Kalibrierung eliminiert.

Im Rahmen der gewählten Messzyklen, der Nullpunktkalibrierung und der verwendeten Sensoren ist davon auszugehen, dass die Selbsterwärmung keinen Einfluss auf die Messungen hat.

## Bauform des Sensors

Für die Oberflächen Messung bieten sich möglichst kleine Sensoren in Rechteckform an, da diese eine glatte Oberfläche besitzen und der Sensor durch die „große“ Oberfläche ein gutes Ansprechverhalten zeigt. Zudem wird die Wärmeübertragung (Konduktion) durch den direkt anliegenden Sensor sichergestellt.

Für Temperaturmessung im Material können zylindrische Sensoren verwendet werden, da diese einfach nachträglich mittels Bohrungen in das Material eingesetzt werden können. Die metallische Schutzhülle sollte so kurz wie möglich gewählt werden, um punktuell messen zu können. Durch das Bohren mit einem genau passenden Bohrer kann der Sensor passgenau eingefügt werden. Eine schräge Bohrung vergrößert den Weg durch die Isothermen. So wird die Wärmemenge, welche über die Sensorkabel eingetragen wird, verringert und es verringert sich so auch die Abweichung der Messung.

Für die Messung von Lufttemperaturen werden die Sensoren gegen langwellige & kurzwellige Strahlung geschirmt. Dazu eignen sich Temperaturfühler mit einem Metallschirm. Niedrige Emissionsgrade reduzieren den Einfluss von Strahlung.

Für die Messung von Strahlungstemperatur ist der Sensor von einer strahlungsabsorbierenden Hülle umgeben. Dazu eignen sich Temperaturfühler mit einer sogenannten Schwarzkugel. Die Kugel hat eine schwarze Beschichtung und damit einen sehr hohen Absorptionsgrad. Die sphärische Geometrie ermöglicht die Aufnahme der Strahlung aus allen Raumrichtungen.

## Befestigung des Sensors auf der Oberfläche

Die Montage der Sensoren hat einen wesentlichen Einfluss auf das Messergebnis. Die Entkopplung des Sensors von dem Montagematerial muss gewährleistet sein.

Sensorpyramide: Gewählt wurde eine Pyramide, welche die Oberfläche nur minimal beeinflusst und gleichzeitig eine sichere Befestigung der Sensoren ermöglicht.

Verklebung: Verklebt werden die Sensoren mit einem kleinen Stück Alubutylklebeband.

Anpressdruck/Befestigung: Getestet wurden vier verschiedenen Varianten. Es erfolgten Tests zu Stabilität, Einfluss, Anpressdruck, Dauerhaftigkeit.

## Weitere mögliche Fehlerquellen

Auf Nachfragen beim Hersteller des MAX31865 wurden von einem Mitarbeiter folgende Fehler benannt:

„Die wichtigsten Fehlerursachen bei der MAX31865-Messung sind Abweichungen im RREF-Widerstandswert und Rauschen an langen RTD-Kabeln. Die Verwendung eines Niedertemperatur-Referenzwiderstandes und die genaue Messung seines Wertes ist der Schlüssel zu präzisen Messungen, da der MAX31865 im Wesentlichen nur den Spannungsabfall über RTDIN+/- betrachtet. Die Verwendung einer Vierleiterkonfiguration kann auch dazu beitragen, Messfehler zu reduzieren, indem sie den durch die Impedanz der RTD-Kabel selbst verursachten Spannungsabfall kompensiert. Letztendlich meldet der MAX31865 lediglich die über die RTDIN+/- Pins gemessene Impedanz, und es liegt an dem Benutzer zu bestimmen, wie sich diese Impedanz auf die Temperatur für seinen speziellen RTD überträgt.“ (Z. Cox, personal communication, 11/2019)

Eigene Übersetzung der E-Mail

- Das Auswerteelement Tinkerforge PTC Bricklet 2.0 verwendet für die Referenzwiderstände 390 bzw. 3900  $\Omega$  Präzisionswiderstände mit einer Toleranz von 0,1 %
- Abweichung durch Impedanz der Sensorleitungen: Kompensation durch Vierleiterschaltung
- Abweichungen durch Rauschen: Reduktion durch Mittelwertbildung, um zufällige/ statistische Fehler auf den Messwerten zu reduzieren und die Genauigkeit zu erhöhen. Die Mittelwertbildung erfolgt direkt in

dem Tinkerforge-System. Dabei wird aus 40 Messwerten ein gleitender Mittelwert gebildet. Die Messdauer beträgt dann 0,8 Sekunden.

- Kalibrierung, um systematische Fehler zu reduzieren sind die Sensoren in der fertigen Konfiguration auf eine festgelegte Referenztemperatur kalibriert.

### Gesamtfehler

Zur Fehlervermeidung wurden folgende Maßnahmen getroffen:

- PT1000 Platin-Temperatursensoren Genauigkeitsklasse F 0,1 (Klasse 1/3 B)
- Vierleiterschaltung
- lange Messzyklen
- Nullpunktkalibrierung

Ausschlaggebend für die Fehler bei dieser Temperaturmessung (0 – 60 °C) ist die Abweichung des Sensors.

$$\Delta t = \pm(0,0017 \cdot |t|)$$

$$\Delta t = \pm(0,0017 \cdot |60 \text{ °C}|)$$

$$\Delta t = \pm 0,102 \text{ °C}$$

### Auswahl des Messsystems für die Luftfeuchtemessung

Für die Anforderungen an die Luftfeuchtemessung wurde eine mittlere Genauigkeit von  $\pm 2\%$  festgelegt. Der erwartete Messbereich liegt zwischen 20 ... 90 % r.F.. Für die Temperaturmessung wird ein Temperaturbereich zwischen -10 °C und 60 °C erwartet. Bei der Auswahl der Sensoren wurden die folgenden Elemente betrachtet.

- Genauigkeit
- Sensortyp
- Langzeit Messverhalten:
- Kondensation auf dem Sensor
- Selbsterwärmung

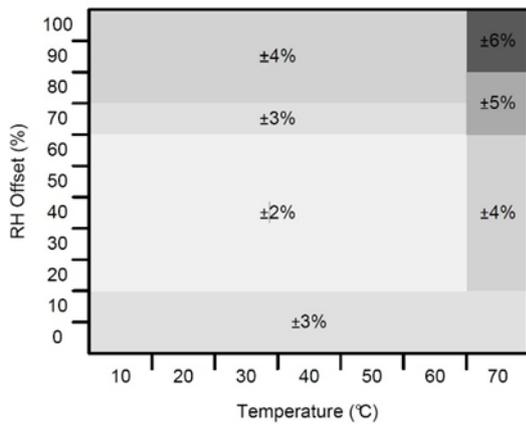
### Auswahl

Auf dem Bricklet kommt ein HDC1080 Sensor von Texas Instruments zum Einsatz. Den Herstellerangaben zufolge entspricht die typische Genauigkeit  $\pm 2\%$ .

Messbereich Luftfeuchte: Einsatzbereich 0 ... 100 % RH (nicht kondensierend)

Die Genauigkeitswerte sind dabei von der Temperatur und der Luftfeuchte abhängig. Die nachfolgende Grafik zeigt die Zusammenhänge:

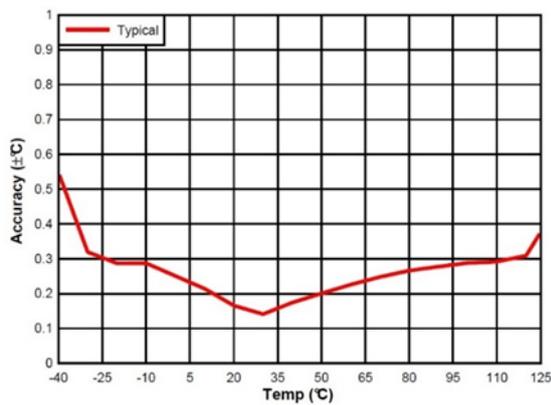
Abbildung 41 Abweichung des Luftfeuchtesensors in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchte



Quelle: (Texas Instruments, Incorporated, 2016, p. 19)

### Messbereich Temperatur

Abbildung 42 Abweichungen der Temperaturmessung



Quelle: (Texas Instruments, Incorporated, 2016, p. 7)

Hysteresis: Im Bereich von  $10\% \leq RH \leq 70\%$   $\pm 1\%$  RH

Langzeit Messverhalten: Langzeit Drift durch Alterungseffekte  $\pm 0.25\%$  RH/a (Bei  $30\text{ °C}$  und  $20\% \leq RH \leq 50\%$ ). Dieser Wert kann durch Staub, verdampfte Lösungsmittel, Ausgasungen von Klebebändern, Klebstoffen, Verpackungsmaterialien usw. beeinflusst werden.

Weiterer Einfluss: Selbsterwärmung durch eine hohe Messfrequenz. Verfälschung der Messergebnisse.

### Auswahl des Messsystems für die Wärmestrommessung

Für die Wärmestrommessung wurde als relative Genauigkeit  $\pm 10\%$  festgelegt. Der Messbereich des Wärmestroms soll zwischen  $-20 \dots +20 \text{ W/m}^2$  liegen. Die erwarteten Temperaturen liegen bei  $10 \dots 40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die folgenden Elemente wurden bei der Auswahl berücksichtigt:

- Genauigkeit
- Sensortyp
- Langzeit Messverhalten
- Sensorelement Veränderung?
- Einfluss der Selbsterwärmung

### Auswahl

erste Abschätzung der zu erwartenden Wärmeströme

$$q = \frac{1}{R} \cdot (\theta_1 - \theta_2)$$

$$q = \frac{1}{3,43 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}} \cdot (40 \text{ }^\circ\text{C} - -20 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$q = 17,49 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$q$  = Wärmestromdichte [ $\text{W/m}^2$ ]  
 $\theta$  = Schichtgrenztemperatur [ $^\circ\text{C}$ ]

### Wärmestrommessplatte

Typ:

Phymeas 7T (Starr Material Epoxidharz)

Abmessungen: 120 mm x 120 mm x 1,5 mm

Aktive Fläche: 90 mm x 90 mm x 1,5 mm

Wärmeleitfähigkeit der Wärmestrommessplatte  $\lambda = 0,2 - 0,3 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$

Kalibrierung:

Wärmestrommessplatte wird bei einer Mittentemperatur von ca.  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  kalibriert.

SN: 190024

Kalibrierwert:  $c = 12,09 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{mV}}$

Änderung des Kalibrierwerts mit der Temperatur:

$$c(\vartheta) = c \cdot (1 + \alpha \cdot (\vartheta - 23 \text{ }^\circ\text{C}))$$

$c$  = Kalibrierwert [ $\text{W/m}^2\text{mV}$ ]  
 $\vartheta$  = Temperatur [ $^\circ\text{C}$ ]

Genauigkeit:

Der Fehler der Kalibrierung ist kleiner 5 %.

Temperatursensor (PT 100 KI. A DIN-IEC 751)

(Phymeas GbR, 2021)

## Verstärker

Eingesetzt wird der AMP 1200 von GreenTEG. Die Verstärkung ist frei einstellbar zwischen 10-5000. Die Ausgangsspannung liegt zwischen 0-10 V die Versorgungsspannung muss zwischen 12 V und 24 V liegen.

Voreinstellungen durch Hersteller:

Verstärkung:	1000x
Offset:	5 V
0 ... 5 V	= negativer Wärmestrom
5 V	= kein Wärmestrom
5 ... 10 V	= positiver Wärmestrom

Die Informationen über Fehler des eingesetzten Verstärkers stammen aus Recherchen und Angaben des Herstellers. (Informationen aus Mails vom 29.05.2019 Ansprechpartner bei GreenTEG Samuel Krebs)

### Offsetfehler:

Beim AMP 2100 liegt der Eingangsoffset bei höchstens 4 Mikrovolt ( $\mu\text{V}$ ).

### Gain-Fehler:

Einstellung des Verstärkers erfolgte durch den Hersteller GreenTEG. Durch Abweichungen bei den zur Einstellung verwendeten Spannungsquellen und Messgeräten kann es zu Abweichungen kommen. Der Fehler wird mit  $< 0,5\%$  angegeben.

### Parasitäre thermocouple-Spannungen:

Dieser Thermoelektrizitätsfehler entsteht durch den sogenannten Seebeck-Effekt. Dieser tritt bei Verbindung von verschiedenen Metallen und einem Temperaturunterschied auf. Die Einflüsse durch diesen Effekt werden hier nur oberflächlich berücksichtigt, die erwarteten Thermospannungen liegen überschlägig unter  $50\ \mu\text{V}$  ( $2 \times 5\ \mu\text{V/K}$  Kupfer-Lötzinn / max. 5 K).

### Temperaturdrift der Bauteile:

Da der Verstärker überwiegend bei Raumtemperatur eingesetzt wird dieser Anteil nur reduziert berücksichtigt. Nach Herstellerangaben liegt der maximale Drift bei  $2\%$  ( $-20 \dots 80\ ^\circ\text{C}$ ).

### Rauschen/Noise:

Das Rauschen wird als Fehlerquelle nicht weiter berücksichtigt. Da sich der Verstärker in einer geschirmten Umgebung befindet. Es befinden sich keine starken elektromagnetischen Felder in der Umgebung. Bei der Auswahl des Netzteils wurde auf eine reduzierte Rippelspannung geachtet diese beträgt  $150\ \text{mVp-p}$ . Durch die langsamen Änderungen der Wärmeströme ist davon auszugehen, dass das Rauschen keinen nennenswerten Einfluss auf die Messung hat.

## Analog Digitalwandler

Industrial Dual Analog In Bricklet 2.0

Typ: MCP3911

Messbereich: - 35 V bis + 35 V (DC)

Genauigkeit: 0,1 % / ± 4 mV über den gesamten Messbereich

Auflösung: 24 Bit (Tinkerforge GmbH, 2021)

## Gesamtfehlerrechnung

Reihenschaltung der Auswerteelektronik, die Fehlerfortpflanzung folgt damit den Regeln der Multiplikation. Der Gainfehler des Verstärkers ist eigentlich ein systematischer Fehler. Da dieser aber nicht extra bestimmt wurde, wird dieser bei den statistischen Fehlern mit einbezogen. Formel stammt aus der mathematischen Formelsammlung von (Papula, 2014, p. 305).

$$\text{Fehler} = \text{Messung} \cdot \text{Verstärkung} \cdot \text{Auswertung}$$

absolute Unsicherheit

$$\Delta WF = 12,09 \frac{W}{m^2 \cdot mV} \cdot 5 \%$$

$$\Delta WF = 0,605 \frac{W}{m^2 \cdot mV}$$

$$\Delta AMP = \text{Offset} + \text{Gainfehler} + \text{Thermoelektrizitätsfehler} + \text{Temperatur Drift}$$

$$\Delta AMP = 1000 \cdot (0,004 \text{ mV} + 1 \text{ mV} \cdot 0,005 + 0,05 \text{ mV} + 1 \text{ mV} \cdot 0,01)$$

$$\Delta AMP = 69 \text{ mV}$$

$$\Delta ADW = 4 \text{ mV}$$

relativer Fehler

$$\left| \frac{\Delta a}{\bar{a}} \right| = \sqrt{\left| \frac{\Delta WF}{WF} \right|^2 + \left| \frac{\Delta AMP}{AMP} \right|^2 + \left| \frac{\Delta ADW}{ADW} \right|^2}$$

$$\left| \frac{\Delta a}{\bar{a}} \right| = \sqrt{\left| \frac{0,605 \frac{W}{m^2 \cdot mV}}{12,09 \frac{W}{m^2 \cdot mV}} \right|^2 + \left| \frac{69 \text{ mV}}{1000 \text{ mV}} \right|^2 + \left| \frac{4 \text{ mV}}{1000 \text{ mV}} \right|^2}$$

$$\left| \frac{\Delta a}{\bar{a}} \right| = 0,0853$$

$$a = \bar{a} \pm \bar{a} \cdot 8,53 \%$$

$\Delta WF$	= absoluter Fehler Wärmestromplatte
$\Delta AMP$	= absoluter Fehler Verstärker
$\Delta ADW$	= absoluter Fehler Analog-Digital-Wandler
$a$	= Ergebnis
$\Delta a$	= Fehler der Messgröße a
$x$	= Messgröße
$\Delta x$	= Fehler der Messgröße x
$y$	= Messgröße
$\Delta y$	= Fehler der Messgröße y
$z$	= Messgröße
$\Delta z$	= Fehler der Messgröße z

## Details zur verbauten Elektrotechnik

Leitungsauswahl für den Versorgungsschaltschrank

230 V 16 A

Für die Leitung von Kubus zu Solarstation wird ein witterungsbeständiges Kabel verwendet es sind drei Leiter notwendig mit je einem Querschnitt von  $1,5 \text{ mm}^2$ . Die Belastbarkeit der Leitung beträgt unter Berücksichtigung von:

- Verlegeart (B2)
- Temperatur (30 °C)
- 16,5 Ampere (Bastian et al., 2008, p. 35)

Der Spannungsabfall beträgt bei 10 m Länge 16 A Maximallast etwa 0,89 % (Phasenverschiebung wird vernachlässigt da keine nennenswerte Blindleistung zu erwarten ist). Bei den zu erwartenden 600 W beträgt der Spannungsabfall nur ~0,3 %.

A = Leiterquerschnitt [ $\text{m}^2$ ]

L = Leiterlänge [m]

I = Leiterstrom [A]

$\gamma$  = Leitfähigkeit (Kupfer 56  $\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$  (Bastian et al., 2008, p. 38))

$\Delta U$  = Spannungsfall [V]

$$A = \frac{2 \cdot L \cdot I \cdot \cos(\varphi)}{\gamma \cdot \Delta U} \quad (\text{Bastian et al., 2008, p. 52})$$

$$\Delta U = \frac{2 \cdot 10 \text{ m} \cdot 3,15 \text{ A}}{56 \cdot 10^6 \frac{1}{\Omega \cdot \text{m}} \cdot 230 \text{ V} \cdot 1,5 \text{ mm}^2} \cdot 10^6 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}^2}$$

$$\Delta U = 0,00326 = 0,33 \%$$

Der Spannungsfall ist so gering wie möglich zu halten, da diese Verlustleistung zur Erwärmung des Kabels beiträgt. Der Spannungsfall von 0,3 % ist unproblematisch. Als Referenzwert für den zulässigen Spannungsfall kann die Angabe der DIN 18015-1 genommen werden.

*„Der Spannungsfall in der elektrischen Anlage hinter der Messeinrichtung bis zum Anschlusspunkt der Verbrauchsmittel sollte 3 % insgesamt nicht überschreiten,“* (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2013, p. 15)

Die Litzen für die Verdrahtung werden in  $1,5 \text{ mm}^2$  ausgeführt. Der Farbcode ist dabei folgender:

- Braun/Schwarz: Phase (L)
- Dunkel Blau: Neutralleiter (N)
- Grün-Gelb: Schutzleiter (PE)

## 24 V 4 A

Für die Leitungen der Kleinspannung werden  $0,5 \text{ mm}^2$  Litzen verwendet. Diese sind ausreichend groß dimensioniert für die maximal möglichen 4 A des Gleichspannungsnetzteils.

Für den Steuerstromkreis gibt es nach ersten Recherchen keinen Höchstwert für den Spannungsabfall, laut Als Orientierungswert kann ein Spannungsabfall von maximal 5 % angenommen werden. Der Steuerstromkreis ist farblich codiert.

Rot: Phase + 24 V

Hellblau: Rückleiter 0 V

Berechnung des Leiterquerschnitts:

$$A = \frac{2 \cdot L \cdot I}{\gamma \cdot \Delta U} \quad (\text{Bastian et al., 2008, p. 38})$$

$$A = \frac{2 \cdot 4m \cdot 4A}{58 \cdot 10^6 \frac{1}{\Omega \cdot m} \cdot 24V \cdot 0,05} \cdot 10^6 \frac{mm^2}{m^2}$$

$$A = 0,46 \text{ mm}^2$$

Die Wahl eines 0,5 mm<sup>2</sup> Querschnitts ist auch für die maximal mögliche Last von 96 W ausreichend.

**Bei Änderung der Leitungslänge oder Austausch des Netzteils ist ein größerer Querschnitt zu wählen!**

Für den Messkasten 2 wird für die 24 V Verdrahtung ein Querschnitt von 1,5 mm<sup>2</sup> verwendet, um spätere Erweiterungen einfacher zu gestalten.

### Sensorleitungen

Für die Leitungen zu den Sensoren werden vier Leiter benötigt, um den Anschluss der Sensoren in einer Vierleiterschaltung auszuführen. Da für die Messleitungen ein Betrieb mit Kleinspannung vorgesehen ist, wird kein Schutzleiter benötigt. Die Vierleiterschaltung ermöglicht das Messen des Widerstands, sodass der Kabelwiderstand vernachlässigt werden kann. Dadurch kann ein möglichst kleiner Querschnitt gewählt werden. Um die Installation der Sensoren zu vereinfachen und auch an schlecht zugänglichen Orten zu ermöglichen, werden Leitungen der Leiterklasse 6 (feinstdrähtig) verwendet. Die Kabeldurchführungen wurden alle entsprechend dem Außendurchmesser der Leitungen dimensioniert.

Auswahl: Sensorleitung, ungeschirmt, 4 x 0,14 mm<sup>2</sup>

Farbcodierung:

**Tabelle 7: Farbcodierung der Temperatursensoren**

Anschluss am Sensor	Anschluss am PTC Bricklet	
	Braun – Schwarz	schwarz
braun		B
Blau – Weiß	weiß	C
	blau	D

## Belegung Leitung

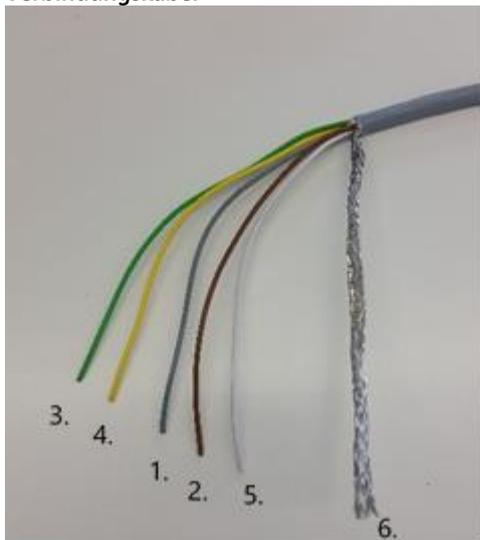
Die Kabelbelegung erfolgt wie hier dargestellt.

Tabelle 8: Farbcodierung Verbindungsleitung

Pin am Stecker	Leitungsfarbe Schaltschrank	Nutzung	Spannung / Signal
1	grau	24 V	DC
2	braun	0 V	DC
3	grün	Modbus	RS485 -
4	gelb	Modbus	RS485 +
5	weiß	Modbus	Ground
6		Schirm	Nicht aufgelegt

Abbildung 43 Farbcodierung

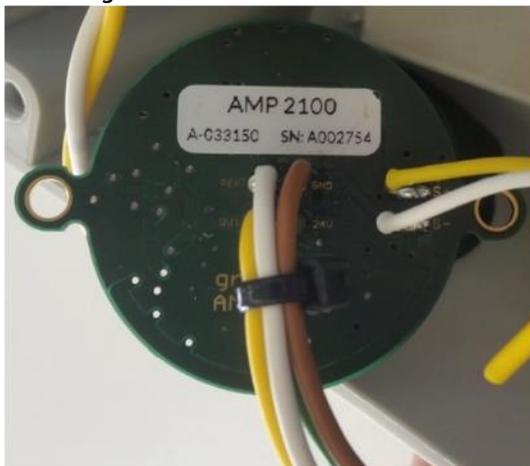
Verbindungskabel



### Farbcodierung GreenTEG

- a. Spannung
  - i. 24 V            24 V            grün
  - ii. 0 V            GND            braun
- b. Eingang
  - i. Sensor            S+            gelb
  - ii. Sensor            S-            weiß
- c. Ausgang
  - i. Ausgang            (out)            gelb
  - ii. Referenz            (ref)            weiß

Abbildung 44 Messverstärker



## Messtechnik-Schaltschrank

Für die Messtechnik wurde ein Kunststoffschaltschrank der Firma Rittal verwendet. Durch das Kunststoffmaterial können später problemlos Erweiterungen vorgenommen werden. Das Material ist mit einem Akkuschrauber oder einer Stichsäge leicht zu bearbeiten. Die Abmessungen wurden etwas größer bemessen, um spätere Erweiterungen zu ermöglichen und auch die Wärme der Bricks besser abführen zu können. Das Fenster ermöglicht eine einfache Kontrolle der Technik sowie den Blick auf das Display, ohne den Schaltschrank öffnen zu müssen. Die Montage der Bauteile erfolgt immer mit Hutschienen, welche auf der Montageplatte angebracht sind. Durch die aktive Befeuchtung in den Kuben ist die Mess- und Elektrotechnik besonders vor Feuchtigkeit zu schützen. Die Durchführungen für Messleitungen sind mit passenden Kabelverschraubungen (IP68) ausgeführt. Für die Tinkerforge Datenleitungen wurde eine „Skintop cube Multi“ Durchführung (IP66) angebracht. So bleibt die Schutzart des Gehäuses (IP56) erhalten. Über die Durchführungen wurde auch die Zugentlastung der Kabel realisiert.

1. Messtechnik Schaltschrank
2. Temperatursensoren
3. Humidity Sensoren
4. Steckverbinder für Wärmestrommessung
5. Sichtfenster zur Kontrolle der Messtechnik
6. Verbindung zum Stromversorgungsschaltschrank

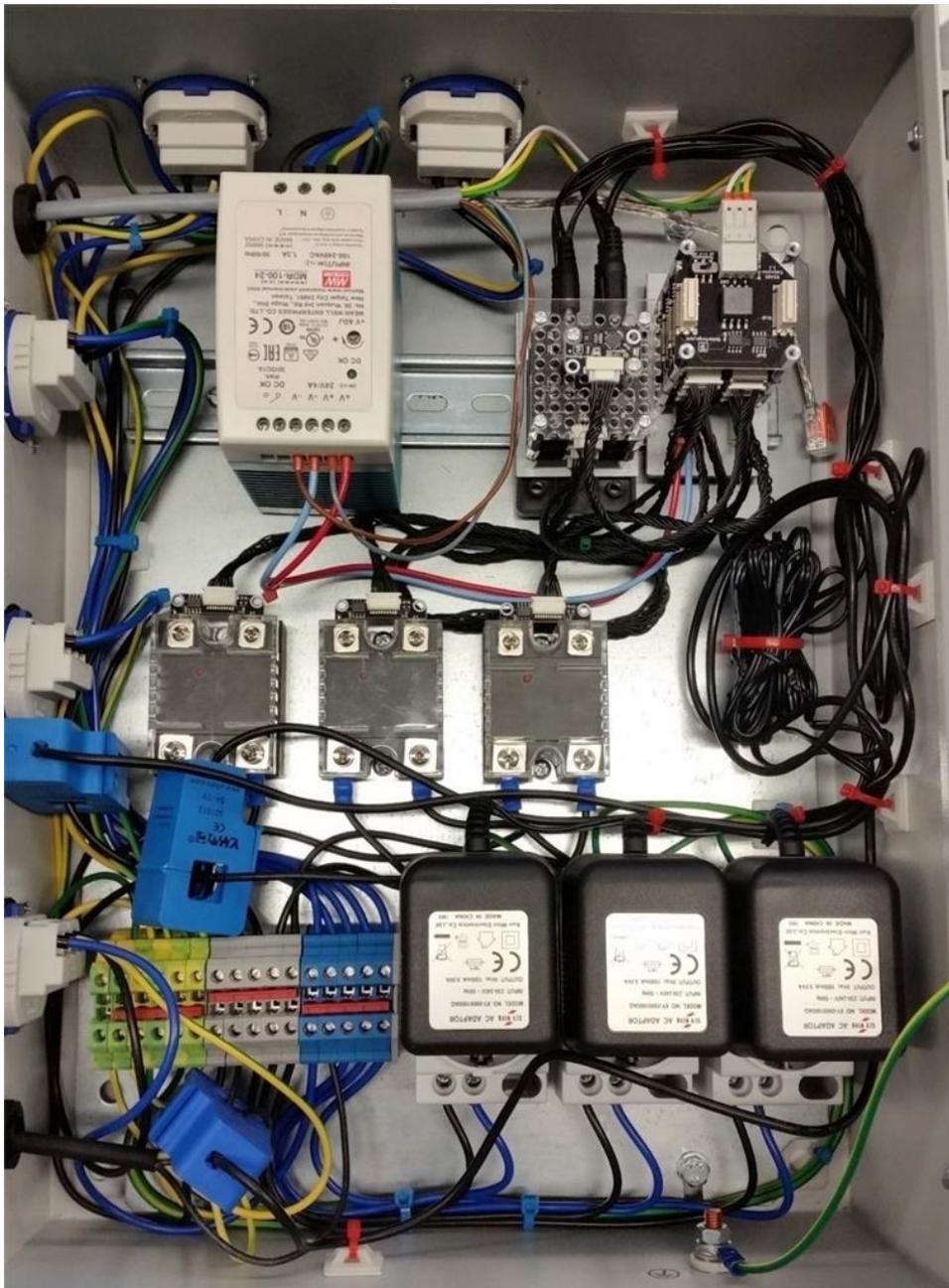
Abbildung 45 Messtechnik Schaltschrank mit Sensoren



## Stromversorgungsschaltschrank

Der Schaltschrank für die Stromversorgung des Kubus ist ebenfalls von der Firma Rittal. Dieser Schaltschrank ist aus Metall, um eine Erdung des Gehäuses zu ermöglichen. Direkt auf die Montageplatte angeschraubt sind die Solid-state relay (SSR). Für die verbauten SSR sind bei einer Umgebungstemperatur von 40 °C ohne Kühlkörper noch 9 A zulässig (Xiamen Jinxinrong Electronics Co. Ltd.). Da an den schaltbaren Steckdosen maximal 300 W nach bisheriger Planung zu erwarten sind, wird diese Belastungsgrenze nicht überschritten  $1,3 A < 9 A$ . Schaltpläne liegen den Schaltschränken bei. Vor der Inbetriebnahme erfolgte für beide Stromversorgungskästen eine Abnahme Prüfung (VDE) inkl. Schutzleitermessung. Diese wurde von der Elektrowerkstatt der TUM durchgeführt und mit einem entsprechenden Prüfsiegel bestätigt. **Wiederholungsprüffristen sind einzuhalten!**

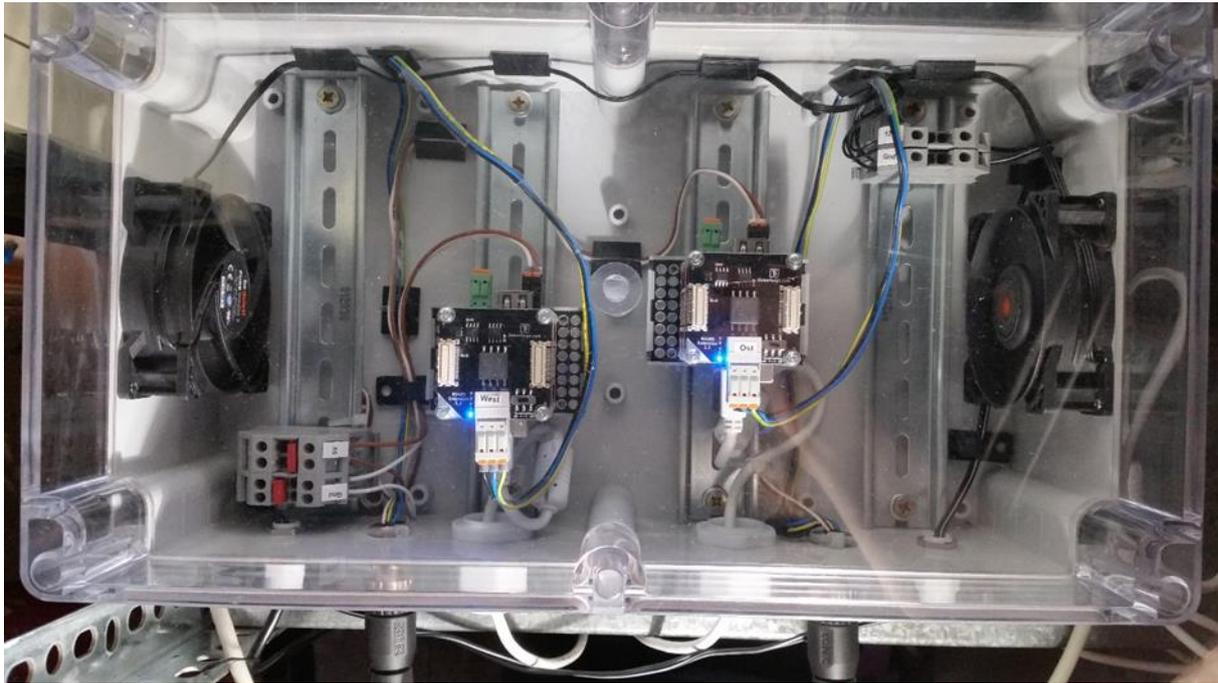
Abbildung 46 Schaltschrank für Stromversorgung



## Redbrick Gehäuse

Um die Abwärme der beiden Redbricks besser abführen zu können, wurde nachträglich ein eigenes Gehäuse entwickelt. Dieses beinhaltet die zwei Redbricks von Kubus Ost und West sowie die dazugehörigen Power Supplys und je eine Modbus Master Extension. Durch die zentrale Unterbringung der Bricks ist auch die Kühlung mit Umgebungsluft möglich. Zudem sind die Redbricks auch über USB über den Remote Computer in der Solarstation angebunden. So lassen sich Datenabfragen, Programmänderungen und Softwareupdates leichter durchführen. Die Anbindung der Redbricks an die Kuben erfolgt über den RS485 Bus. Dieser erlaubt eine zügige Datenübertragung auch über längere Distanzen.

Abbildung 47 Gehäuse für die Redbricks "Red-Box"



## Literaturquellen zum elektrotechnischen Anhang

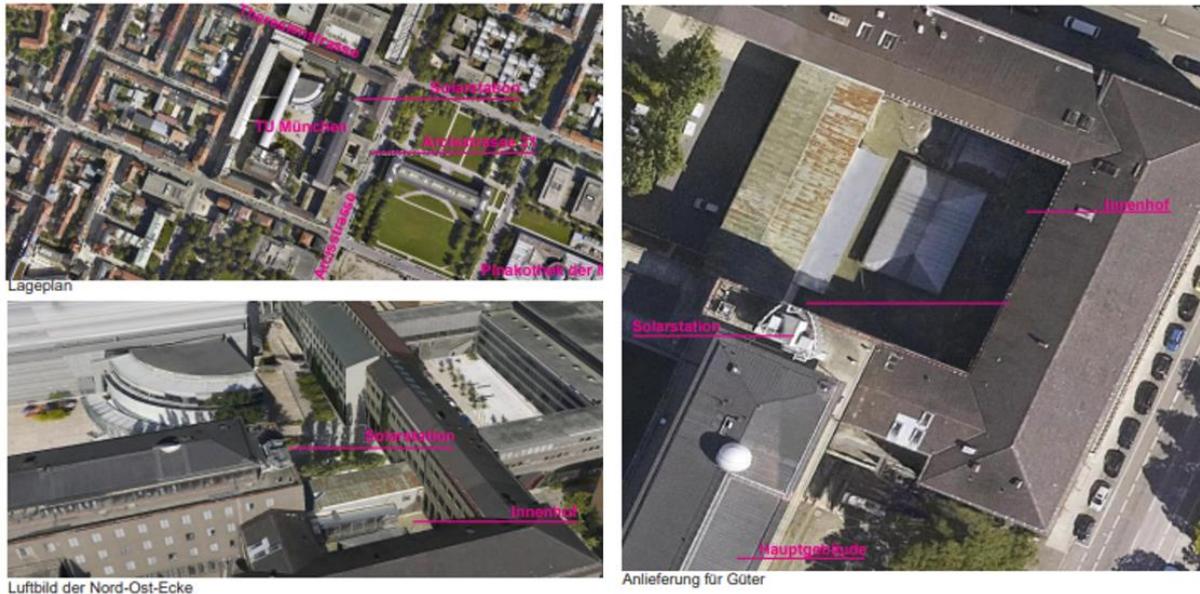
- Bastian, P., Bumiller, H., Burgmaier, M., Eichler, W., Käppel, T., Klee, W., . . . Ziegler, K. (2008). *Fachkunde Elektrotechnik* (26., überarb. und erw. Aufl.). *Europa-Fachbuchreihe für elektrotechnische Berufe*. Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel.
- Bergmann, K. (1996). *Elektrische Messtechnik: Elektrische und elektronische Verfahren, Anlagen und Systeme* (6., überarbeitete und ergänzte Auflage). *Viewegs Fachbücher der Technik*. Wiesbaden, s.l.: Vieweg+Teubner Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-663-01616-8>
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Mai 2009). *Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Temperatursensoren (IEC 60751:2008)*. (DIN EN, 60751). 10772 Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (September 2013). *Elektrische Anlagen in Wohngebäuden – Teil 1: Planungsgrundlagen*. (DIN, 18015-1): Beuth Verlag GmbH.
- Grigull, U., & Sandner, H. (1990). *Wärmeleitung*. Mit 52 Abbildungen (2. Aufl.). *Wärme- und Stoffübertragung*. Berlin: Springer.
- Heraeus (11/2019). *M 222, Platin-Temperatursensor nach DIN EN 60751: Einsatztemperaturbereich -70 °C bis +500 °C, kurzzeitig bis +550 °C*.
- Maxim Integrated (2015). *Datenblatt MAX31865: RTD-to-Digital Converter*.
- Olaf Lüke (2018). *max31865\_lut.c* [Computer software]: Github/Tinkerforge. Retrieved from [https://github.com/Tinkerforge/ptc-v2-bricklet/blob/master/software/src/max31865\\_lut.c](https://github.com/Tinkerforge/ptc-v2-bricklet/blob/master/software/src/max31865_lut.c)
- Papula, L. (2014). *Mathematische Formelsammlung: Für Ingenieure und Naturwissenschaftler; mit zahlreichen Rechenbeispielen und einer ausführlichen Integraltafel* (11.th ed.). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Phymeas GbR (2021, June 29). Kalibrierung | Phymeas: Handel, Kalibrierung und Herstellung physikalischer Messtechnik. Retrieved from [https://www.phymeas.de/?page\\_id=25](https://www.phymeas.de/?page_id=25)
- Siemens Aktiengesellschaft (2016, October 4). *Widerstands-Temperaturkennlinie.png* (1033×662). Retrieved from [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/866/109741866/img\\_234108/v1/Widerstands-Temperaturkennlinie.png](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/866/109741866/img_234108/v1/Widerstands-Temperaturkennlinie.png)
- Texas Instruments, Incorporated (01/2016). *HDC1080 Low Power, High Accuracy Digital Humidity Sensor with Temperature Sensor (Rev. A): (SNAS672,A)*.
- Tinkerforge GmbH (2021, June 29). *Doku | Tinkerforge: Industrial Dual Analog In Bricklet 2.0*. Retrieved from [https://www.tinkerforge.com/de/doc/Hardware/Bricklets/Industrial\\_Dual\\_Analog\\_In\\_V2.html#industrial-dual-analog-in-v2-bricklet](https://www.tinkerforge.com/de/doc/Hardware/Bricklets/Industrial_Dual_Analog_In_V2.html#industrial-dual-analog-in-v2-bricklet)
- Xiamen Jinxinrong Electronics Co. Ltd. *Solid State Relay KS15*.

## Ausführungsdetails des baukonstruktiven Umbaus der Testkuben auf der Solarstation

Johannes Paulik, Michael Kamml, Nina Flexeder

### Standort und Beschreibung der bestehenden Solarstation

Abbildung 48 Luftbilder des Hauptgebäudes der TUM mit Standort der Solarstation



Bildrechte: Philipp Molter

Die umzubauende Solarstation steht auf dem Dach des Hauptgeländes der TU München Arcisstraße 21 in ca. 28 m Höhe. Die Station besteht aus drei Raumkörpern, die auf einem Stahlgerüst der Nordterrasse des Gebäudes stehen. Die Plattform des Stahlgerüsts, auf dem die drei Kuben stehen, liegt ca. auf 3,7 m über dem Terrassenbelag.

Der Zugang für Personen geschieht über den Aufzug des Hauptgebäudes, zu einer Dachterrasse, auf der die Station auf einem Stahlgerüst steht. Dies kragt an der Nordseite ca. 1,5 m über die Fassadenbrüstung über. Der Zugang für Güter und Fahrzeuge geschieht über ein Tor in der Nord-Ost Ecke Arcisstraße / Theresienstraße. Weitere Zufahrt geht über den Innenhof an der Nord-Ost-Fassade des Hauptgebäudes Arcisstraße 21. Güter können über einen Seil- bzw. Kettenzug (max. 200 kg / 30 m Förderhöhe) auf die Plattform der Station gezogen werden.

Abbildung 49 Solarstation auf dem Dach des TUM Hauptgebäudes

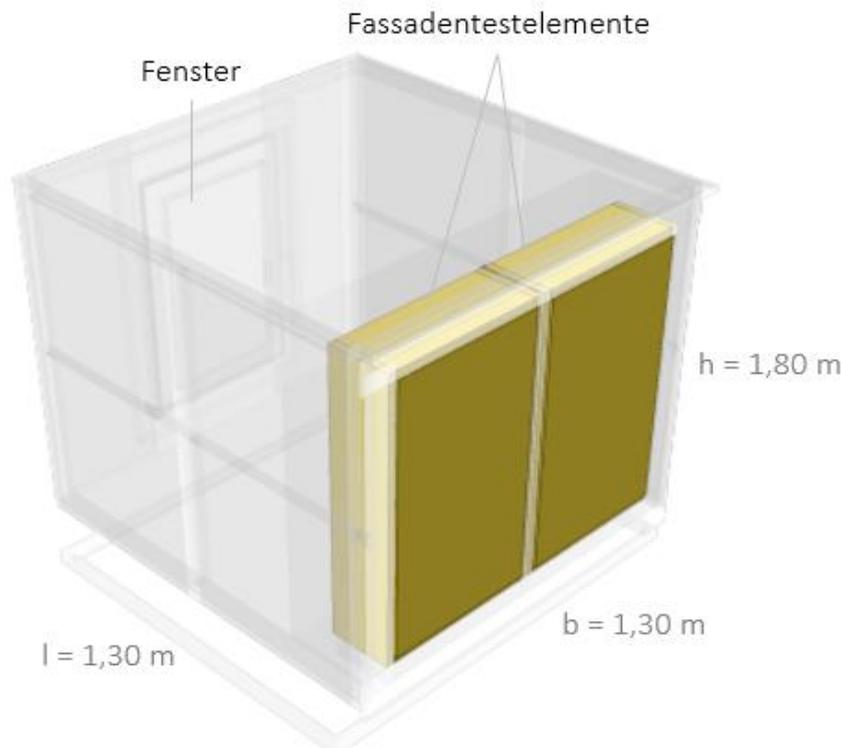


Ein ca. 4,30 x 4,30 x 3,30 (l x b x h in Meter) großer Quader stellt eine 1:1 Simulation eines Raumes dar, dessen südliche Fassade in einem ca. 25° Winkel eine Süd-West Orientierung vorweist. Die beiden Volumena links und rechts des großen Körpers simulieren in einem Maßstab 1:5 Räume und sind in zwei Achsen drehbar um diverse Sonnenstände und Auswirkungen der Sonneneinstrahlung zu simulieren. Ihre Abmessungen betragen ca. 1,30 x 1,30 x 1,80 (l x b x h in Meter). Diese zwei Volumena werden als Testkubena genutzt und in diesem Sinne umgebaut.

**Aufbau der Testkubena**

Übersicht

Abbildung 50 Darstellung des Kubusa mit Außenabmessungen



Kubus West sowie Ost bestehen aus folgenden Bauteilen:

- Boden
- Decke
- Zwei Wände ohne Fenster
- Eine Wand mit Fenster
- Zwei Austauschbare Fassadentestelemente

Um verschiedene Baustoffe hygrothermisch zu untersuchen, werden austauschbare Fassadentestelemente gebaut. Diese werden im Laufe der Langzeitfeldversuche ausgewechselt.

#### Aufbau der Fassadentestelemente

Der Aufbau der Fassadentestelemente ist in „Systematisierung und Schichtenaufbau der Fassadentestelemente“ dargestellt.

## **Beschreibung der baulichen Umsetzung - Einzelschritte**

Die im Kapitel beschriebenen Schritte der Montage der Kuben beziehen sich auf den Umbau beider Kuben.

### Konstruktion des bestehenden Kubus

Es handelt sich um eine Rahmenkonstruktion, die mittels Metallwinkel, metrischen Schrauben und Muttern verbunden ist. Zur Eckaussteifung sind zusätzlich Querstreben (Multiplex) eingeleimt. Bei den Fassadenelementen handelt es sich um Eternitpaneele. Die Eternitpaneele sind eingehängt und durch Edelstahlpressleisten und Dichtgummistreifen mit Edelstahlschrauben und Rampamuffen an den Rahmen geschraubt. Der Zustand der Rahmenhölzer ist je nach Expositionsgrad stark voneinander abweichend.

### **Abbildung 51 Zustand der alten Kubus Konstruktion**



### Demontage des bestehenden Kubus

Die Hüllelemente werden demontiert: Blechdach, Eternitfassadenelemente, pneumatisch gelagertes Türelement, Glasfront, Boden. Dabei bleibt die Rahmenkonstruktion erhalten, die eckaussteifenden Querstreben werden jedoch entfernt (Rahmen geschwächt). Die Dach- und Fassadenelemente werden zur Wiederverwertung eingelagert. Der Rahmen wird, nach dem Lösen der Haltewinkel, von zwei Personen per Hand von der Stahlkonstruktion gehoben.

**Abbildung 52 Zustand der Konstruktionen Ost und West****Montage Unterkonstruktion, Boden und innere OSB – Beplankung (18mm)**

Es wird eine neue Unterkonstruktion aus Konstruktionsvollholz (KVH) direkt auf die Stahlkonstruktion montiert, wofür die alten Haltewinkel wieder verwendet werden. Anschließend wird der Holzrahmen wieder auf die Stahlkonstruktion gehoben und mit der Bodenkonstruktion aus LVL (Laminated Veneer Lumber) durch den Rahmen verschraubt. Als innere Beplankung dienen OSB-Paneele. Diese werden mittels zusätzlicher Halteleisten (Kanthölzer Fichte) montiert, um eine mit dem Rahmen bündige Fläche für den Einbau der VIP-Elemente (Vakuumdämmung) zu erzeugen. Die OSB-Paneele haben jeweils Eckausklinkungen, die als Revisionsöffnungen der Rahmeneckverbindungen dienen, sodass die Blechverkleidung des Daches erneut entfernt werden könnte. Der Rahmen ist teilweise verzogen, wodurch die Montage und Passgenauigkeit erschwert werden. Die Teile werden daher untermaßig geschnitten. Durch die Witterung unbrauchbare Rahmenteile werden ersetzt, v.a. an den Ecken.

**Abbildung 53 Montage der neuen Bodenplatte**

**Abbildung 54 Montage OSB**



Montage Rahmendoppel, Ständer für Fenster, Zusatzschwelle, Riegel, weitere Innenverkleidung und Außenfassade

Ein Rahmendoppel aus LVL wird auf der Seite der Fassadentestelemente montiert. Auf Seite des Fensters werde zwei Ständer aus LVL montiert, deren Zwischenraum wiederum mit OSB Paneelen verkleidet wird. Es werden eine Zusatzschwelle aus LVL und einer Siebdruckplatte sowie ein Riegel aufgedoppelt. Daraufhin wird auch das Dach von Innen mit OSB-Paneelen verkleidet. Die Eternitplatten werden an den Außenseiten bis auf die Seite der Testelemente und der des Fensters wieder eingesetzt. Der Rahmen wird abschließend auf der Bodenkonstruktion befestigt (danach sind nicht mehr alle Schrauben erreichbar, da sie durch das Stahluntergestell blockiert sind). Das Dachblech wird mittels der alten Verbinder remontiert. (Stahlwinkel, Gewindestange und Muttern)

Abbildung 55 Rahmendoppel (links) und Fensterlaibung (rechts)



Abbildung 56 Remontage des metallenen Dachrahmens (links) und fertig beplankter Innenraum (rechts)



#### Bau und probeweise Montage der Rahmen der Fassadentestelemente

Die Rahmenteile werden formatiert, mit Dübelbohrern gebohrt, mit Dübeln versehen und anschließend verleimt und verschraubt. So soll die nötige Stabilität der Eckverbindung gewährleistet werden. Zwei Rahmen aus LVL werden in die Öffnung gestellt und verkeilt.

Abbildung 57 Rahmen der Testelemente verleimt

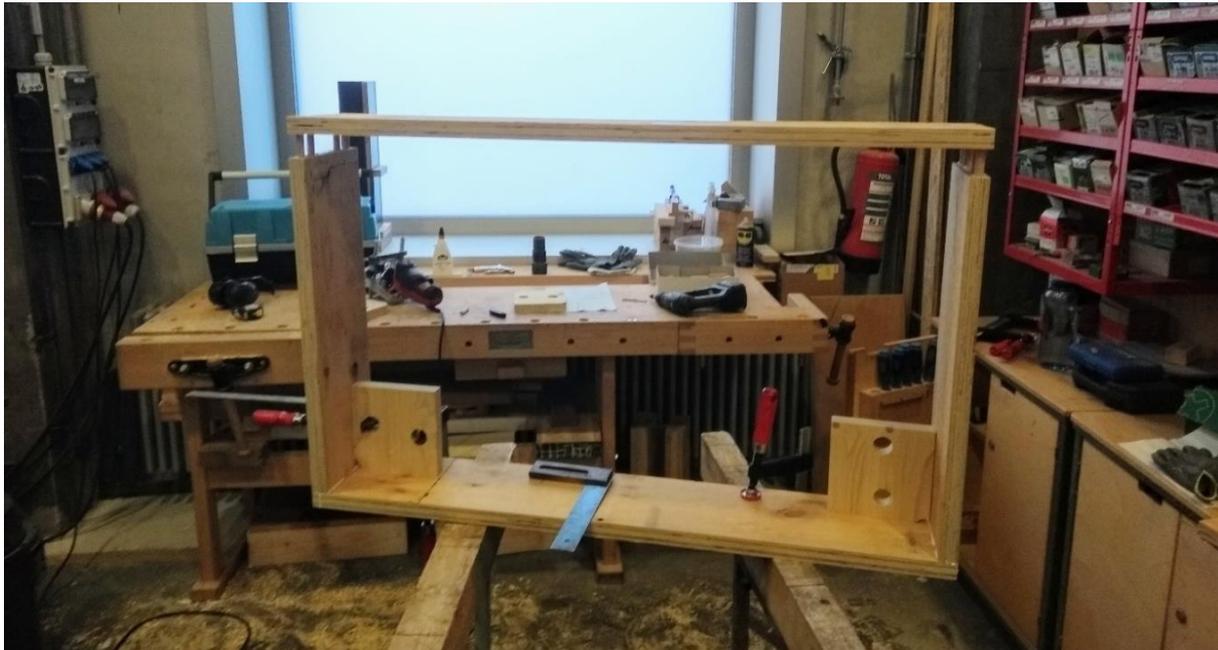


Abbildung 58 Testweises verkleben der Rahmen (Vollbild)



**Abbildung 59 Testweises verklotzen der Rahmen (Detail)**



#### Bau der ersten Fassadentestelemente

Vorgefertigte Rahmen werden mit den einzelnen Wandaufbauten versehen. Einzelteile werden formatiert und eingebracht. Dies geschieht bei den Teilen aus Holz maschinell mit Hilfe der Kreis- und Bandsäge. Die Dämmstoffe werden teilweise per Hand, mit der Dämmstoffsäge zurechtgeschnitten. Die Bestandteile werden jeweils materialgerecht fixiert. Im Anschluss werden die Übergänge zwischen Wandaufbau und Elementrahmen dampfdicht verklebt. Einbringen der Randputzleisten und Auftrag der Putzschichten von Hand mit Hilfe einer Putzkelle. Auftrag und der jeweiligen Oberflächen.

Abbildung 60 Testelemente Holzrahmenbau (links) luftdichte Abklebung (rechts)



Abbildung 61 Holzrahmenbauwand teilbefüllt (links) mit Dämmfaserplatte (rechts)



Abbildung 62 Einlegen der Holzfaserdämmung in die Holzrahmenbauwand (links) und Holzfaserplatte auf das Element (rechts)

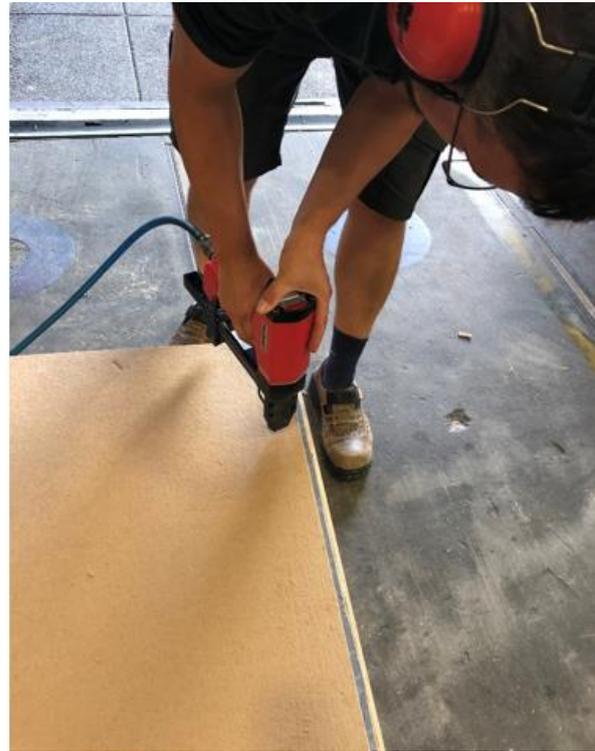


Abbildung 63 Holzrahmenleichtbauwand mit Putzschicht



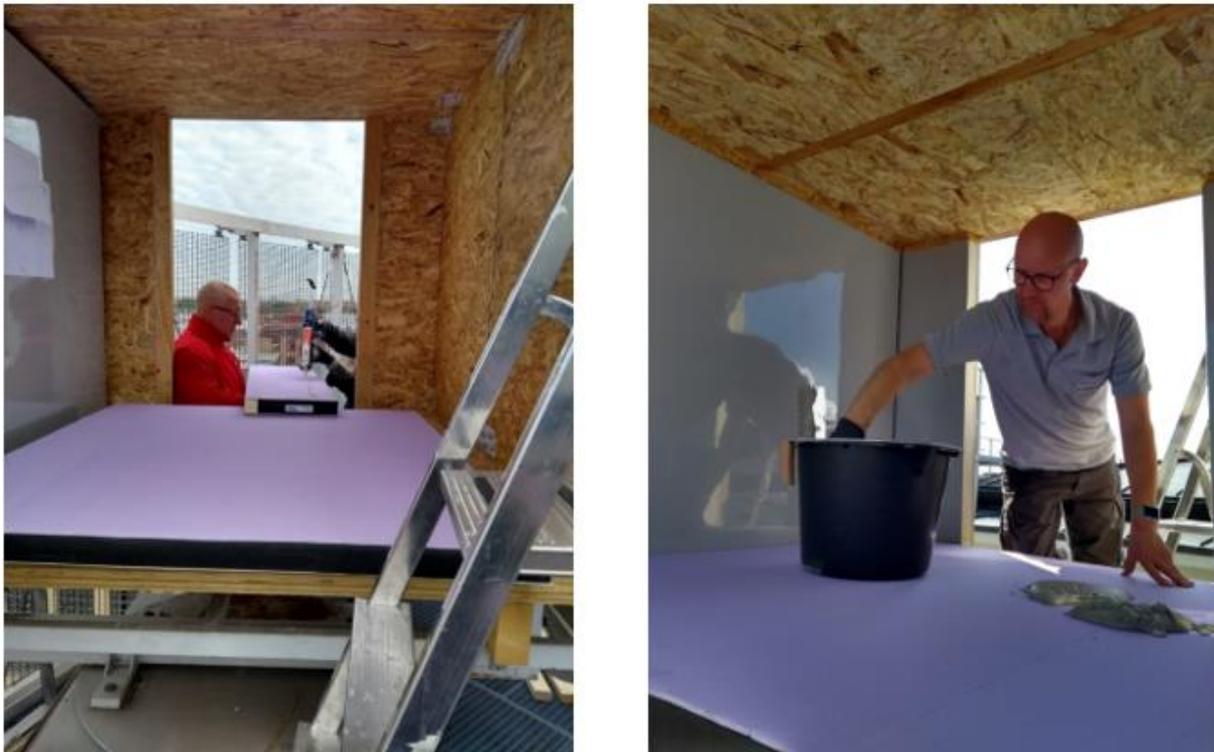
### Installation der Vakuumisolationspaneele

In Zusammenarbeit mit der Herstellerfirma Variotech werden die VIP-Elemente in die Kuben eingebracht. Die Revisionsöffnungen zu Montage des Dachbleches werden abgeklebt. Die seitlichen Elemente werden zuerst mit Fugendichtband umgeben und mittels eines PU-Klebers fixiert. Das Deckenelement durch einen Putzmörtel an die oberen OSB-Platten geklebt. Der Putzmörtel erweist sich jedoch als ungeeignet und die Deckenpaneele werden ebenfalls mit PU-Kleber befestigt. Während der Trockendauer werden alle Elemente verspreizt. Die Stöße werden mit Steinwolle ausgefüllt, um die Dämmung zu gewährleisten

Hinweis zu den VIP-Elementen:

Die Perforation der Elemente, etwa durch Schrauben oder Bohren, ist unter allen Umständen zu verhindern!

### **Abbildung 64 Montage der Vakuumisolationspaneele in die Kuben**



### Einbau Aluminiumskelet und Abkleben des Innenkubus

Für das Innengerüst der Kuben wurden Standard ITEM-Profile verwendet (vorwiegend 40x 40 mm). Das Gerüst stabilisiert die Vakuumdämmpaneele, stützt die eingebauten Fassadentestelemente und bietet zusätzlich Befestigungsmöglichkeiten für Sensoren. Direkt an den beiden Testelementen liegen die zwei kleinen 20 x 40 mm Profile an. Die zwei 80 x 40 mm Profile oben und unten leiten Druckkräfte der Fassadentestelemente dann in den Rahmen des Kubus.

**Abbildung 65 Aluminiumrahmen**



#### Montage der Fenster

Die Fenster werden mit dem Kran auf die Plattform gehoben. Das Fenster werden in der Dämmebene, auf Tragklötzen positioniert und mit Hilfe von Montageankern verschraubt. Die Fensterflügel werden eingehängt und die Olive montiert. Dies erfolgt seitenverkehrt, um den Platz im Inneren bei geöffnetem Fenster besser nutzen zu können. Die das Fenster umgebenden Zonen werden mit Mineralwolle gedämmt und mit Bitumenband versiegelt. Die Seiten werden aufgedoppelt um als Auflage für die Eternitplatten zu dienen. Die vorderen Eternitplatten werden wieder angebracht und ein Fensterverschluss Spannhaken und Schlössern montiert.

**Abbildung 66 Fenstereinbau (links) Fenster abkleben (rechts)**



**Abbildung 67: Fenster fertig eingebaut**



### Sensoren einbohren

Bohrungen von 32 mm Durchmesser werden 1,5 cm, 2,5 cm, 4 cm und 7 cm gesetzt.

Abbildung 68 Wandtestelement mit Bohrungen für die Sensoren



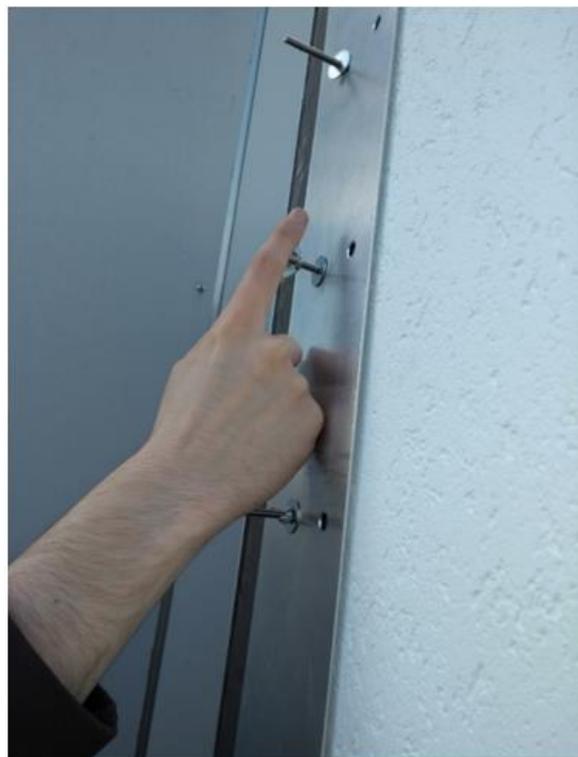
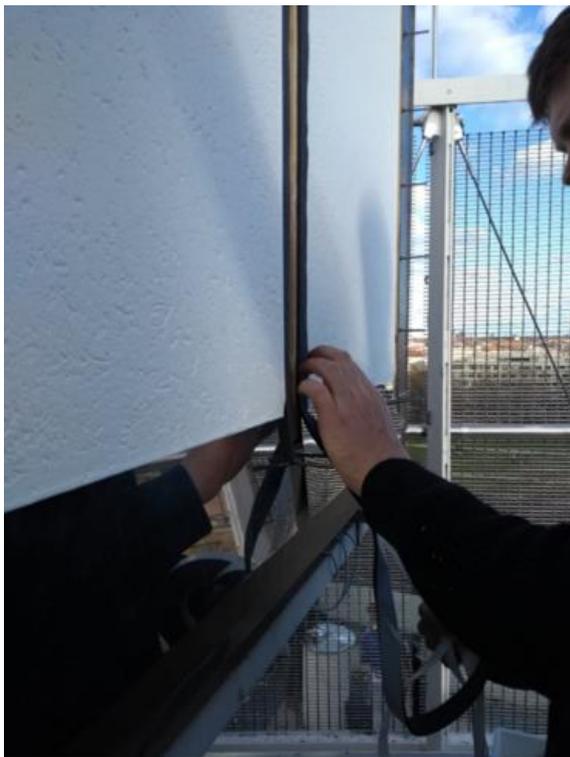
#### Einbau der Testelemente

Versiegelung des Kubusrahmens, indem die exponierte Seite vollflächig mit Bitumenband beklebt wird. Das Bitumenband wird dabei um die Ecke geführt, um von den Eternitplatten überlappt zu werden. Einbohren der Rampamuffen zur Befestigung der Haltebleche. In diese werden Gewindestangen eingebracht, auf welche die Haltebleche gesteckt und mit Flügelmutter reversibel befestigt werden können. Einheben und Verkeilen der Testelemente. Aufbringen der Regen- und Haltebleche in Verbindung mit Fugendichtband. Sichern der Bleche durch Mutter und Spenglerschrauben. Ausdämmen mit Mineralwolle und versiegeln mit Steico Klebeband von Innen.

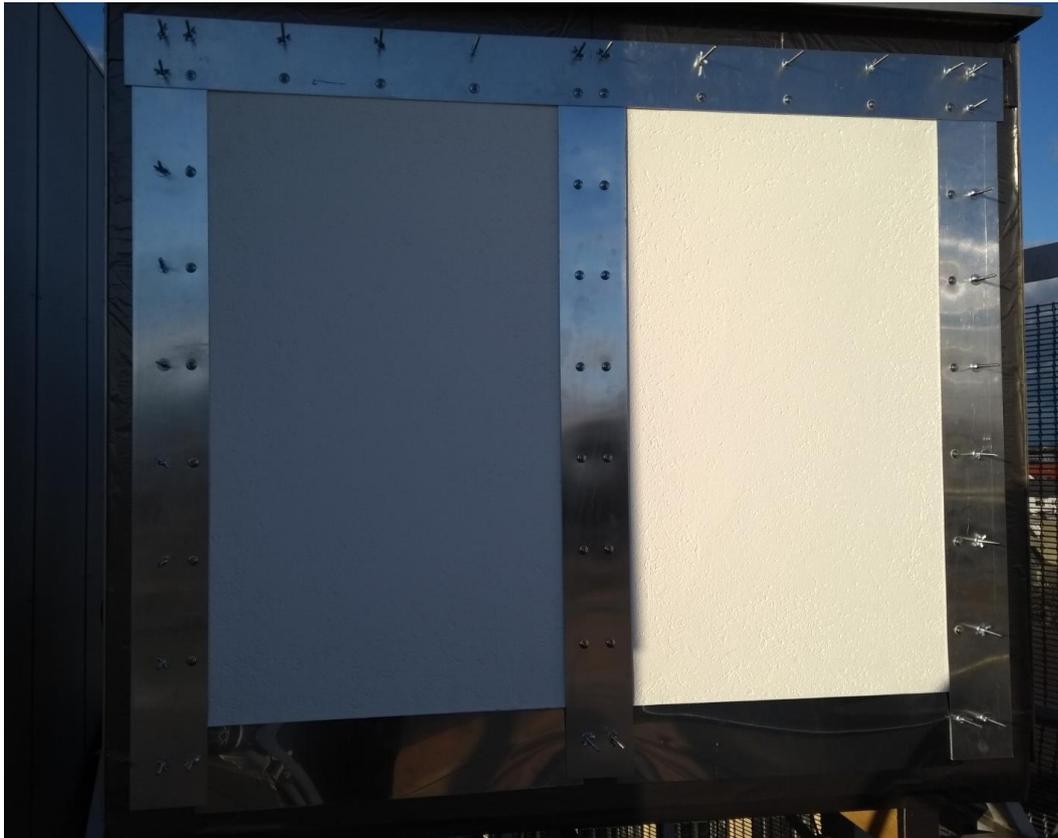
Abbildung 69 Bitumenversiegelung des Kubus (links) Bleche für den Witterungsschutz der Bauteile (rechts)



Abbildung 70 Aufbringen Fugendichtband (links) Verschraubung der Bleche (rechts)



**Abbildung 71** Abgeschlossene Montage der Wandtestelemente, Außenansicht



**Abbildung 72** Abgeschlossene Montage der Wandtestelemente, Innenansicht



### Durchführungen

Um die Kabel und Schläuche in den Kubus einzuführen, wurde pro Kubus, je eine Platte vorgesehen an welcher Verschraubungen angebracht wurden. Die Verschraubungen gewährleisten einerseits einen dichten Verschluss und sorgen auch für die Zugentlastung der Kabel. Für die Durchführung der Daten Kabel wurde ein mehrfach Dichteinsatz verwendet welcher für insgesamt 3 Kabel ausgelegt ist.

Abbildung 73 Aluminiumplatte mit eingebauten Verschraubungen



Abbildung 74 Durchführung für 2x Luft 1x Strom 1x Daten 1x Reserve Blindstopfen



Abbildung 75 Durchführungsplatte im eingebauten Zustand



# Verzeichnisse

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Vergleich der gemessenen Sorptionsisothermen aller untersuchten Baustoffgruppen	6
Abbildung 2 Beispiel für eine der vier Baustoffproben	7
Abbildung 3 Beispiel für eine der vier Baustoffproben	8
Abbildung 4 Vier Baustoffproben #3 a - d	9
Abbildung 5 Vier Baustoffproben #4 a - d	10
Abbildung 6 Beispiel für eine der vier Baustoffproben	11
Abbildung 7 Beispiel für eine der vier Baustoffproben	12
Abbildung 8 Beispiel für eine der vier Baustoffproben	13
Abbildung 9 Vier Baustoffproben #8 a - d	14
Abbildung 10 Vier Baustoffproben #9 a - d	15
Abbildung 11 Vier Baustoffproben #10 a - d	16
Abbildung 12 Beispiel für eine der vier Baustoffproben	17
Abbildung 13 Beispiel für eine der vier Baustoffproben	18
Abbildung 14 Beispiel für eine der vier Baustoffproben	19
Abbildung 15 Vier Baustoffproben #15 a - d	20
Abbildung 16 Vier Baustoffproben #16 a - d	21
Abbildung 17: Zeitliche Abfolge der im Folgenden dargestellten Thermographien	23
Abbildung 18 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit Gipskartonplatte #3	24
Abbildung 19 Probekörper links, Referenzkörper rechts	25
Abbildung 20 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit Gipsfaserplatte #4	26
Abbildung 21 Probekörper links, Referenzkörper rechts	27
Abbildung 22 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit verputzter Gipsfaserplatte #4 + #14	28
Abbildung 23 Probekörper links, Referenzkörper rechts	29
Abbildung 24 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit verputzter Lehmbauplatte #5 + #14	30
Abbildung 25 Probekörper links, Referenzkörper rechts	31
Abbildung 26 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit verputzter Gipsfaserplatte #5 + #14 + Kalkanstrich	32
Abbildung 27 Probekörper links, Referenzkörper rechts	33
Abbildung 28 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit Lehmbauplatte #8	34
Abbildung 29 Probekörper links, Referenzkörper rechts	35
Abbildung 30 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit tangentialem Brettschichtholz #9	36
Abbildung 31 Probekörper links, Referenzkörper rechts	37

Abbildung 32 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit stirnseitigem Brettschichtholz #10	38
Abbildung 33 Probekörper links, Referenzkörper rechts	39
Abbildung 34 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit Holzweichfaserplatte #13	40
Abbildung 35 Probekörper links, Referenzkörper rechts	41
Abbildung 36 a-i Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit lehmverputzter Holzweichfaserplatte (#13 + #14)	42
Abbildung 37 Probekörper links, Referenzkörper rechts	43
Abbildung 38 a-i: Thermographien des Feuchtesprungexperiments mit Porenbetonstein #16	44
Abbildung 39 Probekörper links, Referenzkörper rechts	45
Abbildung 40 Widerstandskennlinie Pt 1000 und Pt 100	46
Abbildung 41 Abweichung des Luftfeuchtesensors in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchte	54
Abbildung 42 Abweichungen der Temperaturmessung	54
Abbildung 43 Farbcodierung Verbindungskabel	60
Abbildung 44 Messverstärker	61
Abbildung 45 Messtechnik Schaltschrank mit Sensoren	62
Abbildung 46 Schaltschrank für Stromversorgung	63
Abbildung 47 Gehäuse für die Redbricks "Red-Box"	64
Abbildung 48 Luftbilder des Hauptgebäudes der TUM mit Standort der Solarstation	66
Abbildung 49 Solarstation auf dem Dach des TUM Hauptgebäudes	67
Abbildung 50 Darstellung des Kubus mit Außenabmessungen	67
Abbildung 51 Zustand der alten Kubus Konstruktion	69
Abbildung 52 Zustand der Konstruktionen Ost und West	70
Abbildung 53 Montage der neuen Bodenplatte	70
Abbildung 54 Montage OSB	71
Abbildung 55 Rahmendoppel (links) und Fensterlaibung (rechts)	72
Abbildung 56 Remontage des metallenen Dachrahmens (links) und fertig beplankter Innenraum (rechts)	72
Abbildung 57 Rahmen der Testelemente verleimt	73
Abbildung 58 Testweises verkleben der Rahmen (Vollbild)	73
Abbildung 59 Testweises verkleben der Rahmen (Detail)	74
Abbildung 60 Testelemente Holzrahmenbau (links) luftdichte Abklebung (rechts)	75
Abbildung 61 Holzrahmenbauwand teilbefüllt (links) mit Dämmfaserplatte (rechts)	75
Abbildung 62 Einlegen der Holzfaserdämmung in die Holzrahmenbauwand (links) und Holzfaserverplatte auf das Element (rechts)	76
Abbildung 63 Holzrahmenleichtbauwand mit Putzschicht	76
Abbildung 64 Montage der Vakuumisulationspaneele in die Kuben	77

Abbildung 65 Aluminiumrahmen	78
Abbildung 66 Fenstereinbau (links) Fenster abkleben (rechts)	79
Abbildung 67: Fenster fertig eingebaut	79
Abbildung 68 Wandtestelement mit Bohrungen für die Sensoren	80
Abbildung 69 Bitumenversiegelung des Kubus (links) Bleche für den Witterungsschutz der Bauteile (rechts)	81
Abbildung 70 Aufbringen Fugendichtband (links) Verschraubung der Bleche (rechts)	81
Abbildung 71 Abgeschlossene Montage der Wandtestelemente, Außenansicht	82
Abbildung 72 Abgeschlossene Montage der Wandtestelemente, Innenansicht	82
Abbildung 73 Aluminiumplatte mit eingebauten Verschraubungen	83
Abbildung 74 Durchführung für 2x Luft 1x Strom 1x Daten 1x Reserve Blindstopfen	83
Abbildung 75 Durchführungsplatte im eingebauten Zustand	83

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Im Feuchtesprungversuch untersuchte Materialien beziehungsweise Materialkombinationen	22
Tabelle 2: DIN EN 60751:2008 S.15 Genauigkeitsklassen für Messwiderstände	47
Tabelle 3: Angaben für Berechnungen des Leitungswiderstands	47
Tabelle 4: Daten des Analog Digital Wandlers	48
Tabelle 5: Messwerte für Wärmeeintrag durch Messstrom	50
Tabelle 6: Berechnung Erwärmung des Sensors Daten aus Datenblatt (Heraeus, 2019)	51
Tabelle 7: Farbcodierung der Temperatursensoren	59
Tabelle 8: Farbcodierung Verbindungsleitung	60